



TUGAS AKHIR - TM141585

**PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH VARIASI
TEKANAN AWAL AKUMULATOR TERHADAP
GAYA REDAM, DAYA LISTRIK BANGKITAN, DAN
RESPON DINAMIS PADA *HYDRAULIC MOTOR
REGENERATIVE SHOCK ABSORBER* (HM RSA)**

SAWUNGSARI NUR FARISAH
NRP. 2111 100 020

Dosen Pembimbing
Dr. Eng. Harus Laksana Guntur S.T, M.Eng

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2015



FINAL PROJECT - TM141585

MODELLING AND ANALYSIS OF INITIAL PRESSURE ACCUMULATOR VARIATION EFFECT TOWARDS DAMPING FORCE, GENERATED ELECTRICITY POWER, AND DYNAMIC RESPONSE OF HYDRAULIC MOTOR REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HMRSa)

SAWUNGSARI NUR FARISAH
NRP. 2111 100 020

Advisor Lecturer
Dr. Eng.HarusLaksana Guntur S.T, M.Eng

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2015

LEMBAR PEGESAHAN

PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH VARIASI TEKANAN AWAL AKUMULATOR TERHADAP GAYA REDAM, DAYA LISTRIK BANGKITAN, DAN RESPON DINAMIS PADA *HYDRAULIC MOTOR REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HM RSA)*

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

SAWUNGSARI NUR FARISAH

Nrp. 2111 100 020

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Dr. Eng. Harus Laksana G., ST, M.Eng.
NIP. 197505111999031001 (Pembimbing)
2. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST, MT.
NIP. 197004121997032003 (Penguji I)
3. Moch.Solichin, ST, MT.
NIP. 2100201405003 (Penguji II)
4. Aida Annisa Amin Daman, ST, MT.
NIP. 2100201405002 (Penguji III)

SURABAYA

Juli 2015

**PEMODELAN DAN ANALISIS PENGARUH
VARIASI TEKANAN AWAL AKUMULATOR
TERHADAP GAYA REDAM, DAYA LISTRIK
BANGKITAN, DAN RESPON DINAMIS PADA
HYDRAULIC MOTOR REGENERATIVE SHOCK
ABSORBER (HMRSA)**

Nama : Sawungsari Nur Farisah
NRP : 2111100020
Jurusan : Teknik Mesin ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST.
M. Eng.

Abstrak

Menurut the official U.S. government source for fuel economy information, hanya sekitar 14%-30% energi yang digunakan untuk menggerakkan kendaraan dan sisanya terbuang begitu saja. Selebihnya, 68% - 72% sebagai engine losses, 4% - 6% sebagai parasitic losses, 5% - 6% sebagai drivetrain losses, 3% sebagai idle losses. Untuk mengatasi masalah tersebut, mahasiswa dari MIT telah mengembangkan shock absorber menjadi Regenerative Shock Absorber (RSA). Beberapa mahasiswa Teknik Mesin ITS juga telah membuat salah satu jenis RSA, yaitu Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA). Dalam tugas akhir ini dilakukan pemodelan dan analisis pengaruh variasi tekanan awal akumulator terhadap respon dinamis dan energi bangkitan pada sistem Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HMRSA). Sistem HMRSA tersebut diaplikasikan pada model seperempat kendaraan. Tekanan awal akumulator divariasikan sebesar 3 sampai 6 bar. Input yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah input sinusoidal dan bump modified. Dari sistem HMRSA didapatkan bahwa semakin besar tekanan awal akumulator, maka semakin

besar gaya redam yang dihasilkan. Namun, tekanan awal akumulator tidak mempengaruhi besarnya nilai voltase, arus, dan daya listrik bangkitan yang dihasilkan. Pada sistem seperempat kendaraan dengan penambahan sistem HMRSA untuk input sinusoidal, pada saat kecepatan 60 km/jam, sistem HMRSA menghasilkan gaya redam terbesar dan daya listrik bangkitan dapat mencapai daya maksimum sebesar 100 watt. Untuk input bump modified, seluruh respon yang dihasilkan merupakan respon transient dan mencapai kondisi steady state kurang dari 2 detik. Sistem HMRSA yang dipasang pada model seperempat kendaraan dibandingkan dengan model seperempat kendaraan dengan sistem peredam konvensional dengan nilai koefisien redaman ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$). Pada grafik displacement transmissibility didapatkan nilai titik tertinggi x_{RMS}/x_0 pada grafik sistem HMRSA sebesar 1,4998 pada saat frekuensi sebesar 1,8519 Hz dan pada grafik sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) sebesar 1,1827 pada saat frekuensi sebesar 0,9259 Hz dengan amplitudo jalan yang digunakan sebesar 2 cm (0,02 m) dan panjang gelombang 3 m.

Kata kunci: sistem suspensi, Regenerative Shock Absorber (RSA), karakteristik dinamis kendaraan, pengaruh tekanan akumulator, gaya redam, daya listrik bangkitan

**MODELLING AND ANALYSIS OF INITIAL PRESSURE
ACCUMULATOR VARIATION EFFECT TOWARDS
DAMPING FORCE, GENERATED ELECTRICITY
POWER, AND DYNAMIC RESPONSE OF HYDRAULIC
MOTOR REGENERATIVE SHOCK ABSORBER (HM RSA)**

Name : Sawungsari Nur Farisah
NRP : 2111100020
Department : Teknik Mesin ITS
Advisor Lecturer : Dr. Eng. Harus Laksana Guntur, ST.
M. Eng.

Abstract

According to the official U.S. government source for fuel economy information, only about 14-30 percent of energy used to drive the vehicle and the residue is wasted. About 68-72 percent of the energy losses in engine (engine losses), 4-6 percent of energy losses as parasitic losses, 5-6 percent of energy losses as drivetrain losses, 3 percent of energy losses as idle losses. To solve the problem, students from MIT improved shock absorber became Regenerative Shock Absorber (RSA). Students from Mechanical Engineering ITS made one of RSA, Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HM RSA). In this research, modelling and analysis of initial pressure accumulator variation effect towards damping force, generated electricity power, and dynamic response of hydraulic motor regenerative shock absorber (HM RSA). Then HM RSA applied to quarter car model. Initial pressure accumulator was varied from 3 bar until 6 bar. In this research used sinusoidal input and bump modified input. From HM RSA system has been known that bigger the initial pressure accumulator, greater damping force. But initial pressure accumulator doesn't affect the value of voltage, current, and

generated electricity power. In the quarter car with HM RSA system, sinusoidal input, when velocity at 60 km/h, HM RSA system produced the largest damping force and the maximum generated electricity power reached 100 watt. For bump modified input, all of the responses were transient responses and reached steady state less than 2 seconds. The quarter car with HM RSA system compared with the quarter car with conventional shock absorber ($c = 20,000 \text{ N-s/m}$). In displacement transmissibility graph, the highest value x_{RMS}/x_0 in HM RSA system reached 1.4998 at frequency 1.8519 Hz and in conventional shock absorber system reached 1.1827 at frequency 0.9259 Hz with using amplitude of road 2 cm (0.02 m) and wavelength 3 m.

Key words: suspension system, Regenerative Shock Absorber (RSA), dynamic characteristic vehicle, effect of pressure accumulator, damping force, generated electricity power

KATA PENGANTAR

Dengan rahmat dari Allah SWT, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “**Pemodelan dan Analisis Pengaruh Variasi Tekanan Awal Akumulator Terhadap Gaya Redam, Daya Listrik Bangkitan, dan Respon Dinamis Pada *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber (HM RSA)***” dengan baik.

Dalam penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagi pihak. Oleh karena itu, penulis hendak mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Djoko dan Ibu Nur, Gembul, Nadia dan keluarga besar Kasmono yang telah mendoakan dan selalu memberi dukungan kepada penulis dalam kondisi apa pun.
2. Bapak Dr. Eng. Harus Laksana Guntur ST.,M.Eng sebagai dosen pembimbing yang selalu memberikan bimbingan, dukungan, dan motivasi, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Prof. Ir. I Nyoman Sutantra, M.Sc., Ph.D, Ibu Dr. Wiwiek Hendrowati, ST,MT., Bapak Moch. Solichin, ST,MT., Ibu Aida Annisa Amin Daman, ST, MT. sebagai dosen penguji yang telah memberikan saran kepada penulis.
4. Seluruh dosen jurusan Teknik Mesin FTI ITS yang telah mendidik dan mengajarkan ilmu pengetahuan kepada penulis.

Penulis menyadari kekurangan yang ada pada Tugas Akhir ini, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan untuk kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan para pembaca pada umumnya, sebagai bentuk sumbangsih penulis untuk kemajuan bangsa Indonesia.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR SIMBOL	xvi

BAB I PENDAHULUAN

1. 1	Latar Belakang	1
1. 2	Rumusan Masalah	2
1. 3	Batasan Masalah	2
1. 4	Tujuan	3
1. 5	Manfaat	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2. 1	Sistem Suspensi Regeneratif	5
2. 2	Redaman	16
2. 3	Motion of Base	17
2. 4	Persamaan Pada Mekanisme Hidrolik	20
2.4.1.	Persamaan Bernoulli	20
2.4.2.	Konservasi Massa pada Mekanika Fluida	21
2.4.3.	<i>Head Loss</i>	22
2. 5	Akumulator Hidrolik	26
2. 6	Motor Hidrolik	29
2. 7	Generator	30
2. 8	Displacement Transmissibility	32
2. 9	Pengaruh Percepatan Kendaraan terhadap Kenyamanan Pengendara	34

BAB III METODOLOGI

3. 1	Metodologi Penelitian	37
3.1.1	Tahap Studi Literatur	39
3. 2	Pemodelan dan Simulasi Sistem HMRSA	40
3.2.1	Pemodelan Fisik Sistem HMRSA	40
3.2.2	Pemodelan Matematis dan Pembuatan Persamaan dari Sistem HMRSA	43
3.2.3	Pembuatan Blok Simulasi Sistem HMRSA	44
3.2.4	Analisis Grafik Sistem HMRSA	46
3. 3	Pemodelan dan Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan dengan HMRSA	47
3.3.1	Pemodelan Matematis dan Pembuatan Persamaan dari Sistem HMRSA	47
3.3.2	Pembuatan Blok Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan dengan HMRSA	48
3.3.3	Analisis Grafik Sistem Seperempat Kendaraan dengan HMRSA	50

BAB IV PEMODELAN SISTEM

4.1	Pemodelan Dinamis Sistem HMRSA	51
4.1.1.	Sistem Hidrolik dengan Penambahan Akumulator	51
4.1.2.	Motor Hidrolik, Gear, dan Torsi Elektrik pada Generator	55
4.1.3.	Persamaan generator yang telah dilinierkan (untuk T_e , V , dan I)	57
4.2	Pemodelan Dinamis Seperempat Kendaraan dengan Penambahan HMRSA	62
4.3	Diagram Blok	63
4.3.1.	Input yang Digunakan	64
4.3.2.	Diagram Blok Sistem HMRSA	66
4.3.3.	Diagram Blok Sistem Seperempat Kendaraan dengan Penambahan HMRSA	69

BAB V ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1	Respon Dinamis pada Pasangan Diameter Silinder Hidrolik, Diameter Batang Piston, Diameter Pipa dengan Variasi Frekuensi	74
5.2	Respon Dinamis Sistem HMRSA	81
5.2.1.	Perbandingan Respon Gaya Redam pada Sistem Hidrolik dengan dan Tanpa Akumulator	82
5.2.2.	Respon Gaya Redam, Voltase, Arus, dan Daya Listrik Bangkitan dengan Variasi Tekanan Awal Akumulator	84
5.3	Respon Dinamis Sistem Seperempat Kendaraan dengan Penambahan Sistem HMRSA	86
5.3.1.	Input Bump	87
5.3.2.	Input Sinusoidal	89
5.4	Perbandingan Sistem HMRSA dengan Koefisien Redaman Pada Model Seperempat Kendaraan	92
5.4.1.	Input Bump	92
5.4.2.	Input Sinusoidal	94
5.4.3.	<i>Displacement Transmibillity</i> dan Respon Percepatan RMS	101

BAB VI PENUTUP

6.1	Kesimpulan	107
6.2	Saran	109

DAFTAR PUSTAKA

UCAPAN TERIMA KASIH

BIODATA PENULIS

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1	Perbandingan daya yang dihasilkan HMRSA ^[5]	13
Tabel 2. 2	Perhitungan energi bangkitan HMRSA ^[4]	15
Tabel 2. 3	<i>Minor Loss Coefficient</i> untuk pintu masuk pada pipa ^[12]	23
Tabel 2. 4	<i>Loss coefficient</i> untuk kontraksi bertahap: saluran bulat dan persegi panjang ^[12]	25
Tabel 2. 5	<i>Representative dimensionless equivalent lengths (L_e/D)</i> untuk katup dan <i>fitting</i> ^[12]	26
Tabel 2. 6	Karakteristik untuk tipe-tipe akumulator ^[7]	27
Tabel 3. 1	Parameter untuk sistem HMRSA	44
Tabel 3. 2	Parameter untuk sistem seperempat kendaraan (<i>heavy truck</i>) ^[19]	49
Tabel 4. 1	Hasil pengujian generator untuk SOC 50%	57
Tabel 4. 2	Torsi elektrik yang dihasilkan untuk SOC 50%	58
Tabel 4. 3.	Parameter hasil linearisasi untuk simulasi dari uji eksperimen	62
Tabel 5. 1	Parameter yang digunakan saat simulasi respon dinamis pada pasangan diameter silinder, diameter batang piston, dan diameter batang pipa dengan variasi frekuensi	74
Tabel 5. 2	Nilai gaya redam maksimum (kondisi ekspansi) untuk diameter silinder ($D = 5$ cm) dan diameter batang piston ($d = 3$ cm) pada masing-masing diameter pipa	79
Tabel 5. 3	Nilai gaya redam maksimum (kondisi ekspansi) untuk diameter silinder ($D = 3$ cm) dan diameter batang piston ($d = 1,8$ cm) pada masing-masing diameter pipa	80
Tabel 5. 4	Nilai gaya redam yang dihasilkan pada sistem hidrolik dengan dan tanpa akumulator	82
Tabel 5. 5	Nilai gaya redam yang dihasilkan dari sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal akumulator	84

Tabel 5. 6	Nilai RMS untuk respon gaya redam yang dihasilkan dengan variasi kecepatan	100
Tabel 5. 7	Nilai RMS untuk respon dinamis dengan variasi kecepatan	100
Tabel 5. 8	Parameter untuk perpindahan dan percepatan (RMS) menggunakan sistem HMRSA	101
Tabel 5. 9	Parameter untuk perpindahan dan percepatan (RMS) menggunakan $c = 20.000 \text{ N-s/m}$	101

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1	Skema dari HESA ^[8]	5
Gambar 2. 2	Grafik karakteristik gaya redam dari HESA ^[8]	6
Gambar 2. 3	Skema diagram HEERS. A, B, dan C merupakan simpul dari pipa hidraulik (ditunjukkan dengan titik) ^[1]	7
Gambar 2. 4	Pengaruh perbedaan diameter dalam pipa hidrolis ^[1]	8
Gambar 2. 5	Skema dari RSA ^[2]	9
Gambar 2. 6	Grafik dari energi bangkitan yang dihasilkan oleh RSA ^[2]	10
Gambar 2. 7	Skema untuk <i>hydraulic pumping regenerative suspension</i> ^[10]	11
Gambar 2. 8	Konstruksi HMRSA dari Kaspul Anuar ^[5]	12
Gambar 2. 9	Prinsip kerja HMRSA dari Kaspul Anuar ^[5]	12
Gambar 2. 10	Energi bangkitan dari HMRSA ^[5]	13
Gambar 2. 11	Skema HMRSA setelah pengembangan ^[4]	14
Gambar 2. 12	Diagram batang energi bangkitan HMRSA ^[4]	15
Gambar 2. 13	Diagram <i>stress-strain</i> dari sebuah massa yang mempunyai <i>material damping</i> ^[9]	17
Gambar 2. 14	Contoh sederhana dari sistem <i>free vibration with damping</i>	17
Gambar 2. 15	Contoh sederhana dari sistem <i>forced vibration with damping</i>	18
Gambar 2. 16	Gambar seperempat bus ^[16]	19
Gambar 2. 17	Penerapan hukum Bernoulli pada sebuah pipa	20
Gambar 2. 18	Ilustrasi untuk aliran dalam suatu kontrol volume	21
Gambar 2. 19	<i>Loss coefficient</i> untuk aliran melalui perubahan <i>sudden area</i> ^[12]	24
Gambar 2. 20	<i>Representative total resistance (L_e/D)</i> untuk (a) pipa belokan (<i>bend</i>) dan siku bergelang (<i>flanged elbow</i>) 90° dan (b) belokan <i>miter</i> (<i>miter bend</i>) ^[12]	25
Gambar 2. 21	<i>Compressed Gas Accumulator</i>	28
Gambar 2. 22	Skema RL Circuit untuk Generator	31

Gambar 2. 23	Grafik <i>displacement transmissibility</i>	33
Gambar 2. 24	Ketahanan badan manusia terhadap percepatan linier yang dapat diterima	35
Gambar 2. 25	Grafik percepatan RMS berdasarkan ISO 2631 ^[20]	36
Gambar 3. 1	Diagram alir penyelesaian tugas akhir	38
Gambar 3. 2	Model fisik rancangan sistem HMRSA	40
Gambar 3. 3	Aliran fluida saat piston bergerak ke bawah (kompresi)	41
Gambar 3. 4	Aliran fluida saat piston bergerak ke atas (ekspansi)	42
Gambar 3. 5	Model matematis rancangan sistem HMRSA	43
Gambar 3. 6	Diagram alir proses pembuatan persamaan gerak dari sistem HMRSA	44
Gambar 3. 7	Diagram alir proses pembuatan blok diagram Simulink dari sistem HMRSA	46
Gambar 3. 8	Model matematis sistem seperempat kendaraan dengan F_d merupakan sistem HMRSA	47
Gambar 3. 9	Diagram alir proses pembuatan persamaan gerak dari sistem HMRSA	48
Gambar 3. 10	Diagram alir proses pembuatan blok diagram Simulink dari sistem seperempat kendaraan dengan HMRSA	50
Gambar 4. 1	Skema untuk sistem hidrolik dengan penambahan akumulator	51
Gambar 4. 2	FBD untuk pasangan <i>spur gear</i>	55
Gambar 4. 3	Grafik voltase pada SOC 50% beserta linierisasi	59
Gambar 4. 4	Grafik arus pada SOC 50% dengan linierisasi	60
Gambar 4. 5	Grafik torsi elektrik pada SOC 50% beserta linierisasi	61
Gambar 4. 6	FBD untuk sistem seperempat kendaraan dan F_d merupakan gaya redaman dari sistem HMRSA	62
Gambar 4. 7	Profil jalan dengan input sinusoidal	64
Gambar 4. 8	Profil jalan dengan input <i>bump</i> yang dimodifikasi	65

Gambar 4. 9	Diagram blok untuk sistem HMRSA	66
Gambar 4. 10	Diagram blok untuk silinder hidrolik	66
Gambar 4. 11	Diagram blok untuk akumulator	67
Gambar 4. 12	Diagram blok untuk <i>major headloss</i> dan <i>minor headloss</i>	67
Gambar 4. 13	Diagram blok untuk gear	67
Gambar 4. 14	Diagram blok untuk torsi elektrik	68
Gambar 4. 15	Diagram blok untuk arus yang dihasilkan HMRSA	68
Gambar 4. 16	Diagram untuk voltase yang dihasilkan HMRSA	68
Gambar 4. 17	Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA untuk input <i>sinusoidal</i>	70
Gambar 4. 18	Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA untuk input <i>bump modified</i>	71
Gambar 4. 19	Diagram blok untuk input <i>bump modified</i>	72
Gambar 5. 1	Skema dari silinder hidrolik	74
Gambar 5. 2	Grafik respon gaya redam terhadap perpindahan dan kecepatan pada pasangan diameter silinder hidrolik ($D = 5$ cm), diameter batang piston ($d = 3$ cm), dan diameter pipa ($d_{\text{tube}} = 2\text{-}5$ mm) dengan variasi frekuensi	76
Gambar 5. 3	Grafik respon gaya redam terhadap perpindahan dan kecepatan pada pasangan diameter silinder hidrolik ($D = 3$ cm), diameter batang piston ($d = 1,8$ cm), dan diameter pipa ($d_{\text{tube}} = 2\text{-}5$ mm) dengan variasi frekuensi	78
Gambar 5. 4	Grafik pengaruh variasi frekuensi terhadap diameter silinder ($D = 5$ cm) dan diameter batang piston ($d = 3$ cm) pada masing-masing diameter pipa	79
Gambar 5. 5	Grafik pengaruh variasi frekuensi terhadap diameter silinder ($D = 3$ cm) dan diameter batang	

	piston ($d = 1,8 \text{ cm}$) pada masing-masing diameter pipa	80
Gambar 5. 6	Grafik perbandingan gaya redam terhadap (a) perpindahan dan (b) kecepatan pada sistem hidrolik dengan dan tanpa akumulator	82
Gambar 5. 7	(a) Grafik perbandingan gaya redam terhadap kecepatan pada sistem hidrolik dengan dan tanpa akumulator, dan (b) merupakan grafik perbesaran dari grafik (a)	83
Gambar 5. 8	Grafik respon gaya redam terhadap (a) perpindahan dan (b) kecepatan pada sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal akumulator (p_0)	84
Gambar 5. 9	Grafik respon (a) voltase, (b) arus, dan (c) daya listrik bangkitan terhadap kecepatan pada sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal akumulator	85
Gambar 5. 10	Grafik respon gaya redam terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i>	87
Gambar 5. 11	Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada massa <i>sprung</i> terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i>	88
Gambar 5. 12	Grafik respon (a) voltase, (b) arus, dan (c) daya listrik bangkitan terhadap waktu dengan input <i>bump modified</i>	89
Gambar 5. 13	Grafik respon gaya redam terhadap waktu dengan variasi kecepatan	89
Gambar 5. 14	Grafik respon (a) voltase, (b) arus, dan (c) daya listrik bangkitan terhadap waktu dengan variasi kecepatan	91
Gambar 5. 15	Grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada input <i>bump modified</i>	92
Gambar 5. 16	Grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa <i>sprung</i>	

	terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada input <i>bump modified</i>	93
Gambar 5. 17	Grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada kecepatan 20 km/jam	94
Gambar 5. 18	Grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa <i>sprung</i> terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada kecepatan 20 km/jam	95
Gambar 5. 19	Grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada kecepatan 40 km/jam	96
Gambar 5. 20	Grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa <i>sprung</i> terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada kecepatan 40 km/jam	97
Gambar 5. 21	Grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada kecepatan 60 km/jam	98
Gambar 5. 22	Grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa <i>sprung</i> terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada kecepatan 60 km/jam	99
Gambar 5. 23	Grafik <i>displacement transmissibility</i> dan daya listrik bangkitan yang dihasilkan	102
Gambar 5. 24	Grafik respon percepatan RMS terhadap frekuensi dengan asumsi lambda sebesar 3 meter	104

DAFTAR SIMBOL

d	: diameter batang piston (m)
D	: diameter silinder hidrolik (m)
d_{tube}	: diameter pipa (m)
ρ	: massa jenis fluida (kg/m^3)
ν	: viskositas kinematik fluida (m^2/s)
η_v	: efisiensi volumetric
η_m	: efisiensi mekanik
q	: perpindahan motor hidrolik (cc/rev)
d_{g1}	: diameter gear 1 (m)
d_{g2}	: diameter gear 2 (m)
m_{g1}	: massa gear 1 (kg)
m_{g2}	: massa gear 2 (kg)
m_s	: sprung mass (kg)
m_{us}	: unsprung mass (kg)
k_s	: suspension stiffness (N/m)
k_{us}	: tire stiffness (N/m)
c_{us}	: unsprung damping coefficient (N.s/m)
p_1	: Tekanan fluida pada kondisi 1 (N/m^2)
p_2	: Tekanan fluida pada kondisi 2 (N/m^2)
v_1	: Kecepatan aliran fluida pada kondisi 1 (m/s)
v_2	: Kecepatan aliran fluida pada kondisi 2 (m/s)
h_1	: Tinggi pipa kondisi 1 (m)
h_2	: Tinggi pipa kondisi 2 (m)
g	: gravitasi bumi (m/s^2)
p_0	: tekanan awal pada akumulator
V_0	: volume awal pada akumulator
x	: perpindahan dari piston pada silinder hidrolik
n	: <i>polytrophic gas index</i>
ω	: kecepatan putaran motor hidrolik (rad/s)
T_m	: torsi motor hidrolik (N.m)
Q_m	: debit aliran fluida yang masuk ke motor hidrolik (m^3/s)
q	: perpindahan motor hidrolik (cc/rev)
p_m	: tekanan pada motor hidrolik (Pa)

V_e	: <i>electromotive voltage</i> (Volt)
L	: induktansi internal (Henries)
I	: arus (Ampere)
T_e	: torsi elektrik (N.m)
N	: jumlah lilitan
B	: induksi magnetik (Tesla)
l	: panjang kumparan (m)
a	: jarak kepada kawat (m)
c_{Te}	: koefisien torsi elektrik (N.m.s/rad)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut *the official U.S. government source for fuel economy information*^[13], hanya sekitar 14%-30% energi yang digunakan untuk menggerakkan kendaraan dan sisanya terbuang begitu saja. Selebihnya, 68% - 72% sebagai *engine losses*, 4% - 6% sebagai *parasitic losses*, 5% - 6% sebagai *drivetrain losses*, 3% sebagai *idle losses*.

Untuk mengatasi masalah tersebut, Zack Anderson^[14], mahasiswa dari MIT, telah mengembangkan *shock absorber* menjadi *regenerative shock absorber*. Energi yang terbuang pada *shock absorber* dapat dimanfaatkan dengan mengubahnya menjadi energi listrik. Dalam penelitiannya, *regenerative shock absorber* diuji pada truk dan dapat menghasilkan sekitar 1 kW pada jalan yang standar. Dalam studi Hsu^[3], kemampuan pemulihan energi pada saat berkendara di jalan tol dengan kecepatan 16 m/s untuk setiap roda sebesar 100W yang sama dengan 5% dari total daya pada kendaraan.

Beberapa mahasiswa Teknik Mesin ITS juga telah membuat salah satu jenis RSA (*Regenerative Shock Absorber*), yaitu *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA). Pada penelitian tersebut RSA ditambahkan motor hidraulik dengan putaran yang searah. Untuk membuat putaran searah, digunakan *check valve*. Energi bangkitan yang dihasilkan HMRSA tersebut pada saat frekuensi 1,5 Hz, yaitu sebesar 1.745 W dan energi tersebut dapat dimanfaatkan untuk mengisi aki pada mobil. Untuk penelitian kali ini, HMRSA tersebut ditambahkan akumulator jenis *compressed gas accumulator* sehingga menjadi *Hydropneumatic Regenerative Shock Absorber* (HRSA). Dan nantinya akan didapatkan respon dinamis pada sistem tersebut yang dapat dijadikan pertimbangan untuk melakukan pengembangan pada RSA ini.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana model dinamis sistem *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HM RSA) dengan variasi tekanan awal pada akumulator (p_0)?
2. Bagaimana karakteristik gaya redam dan energi listrik bangkitan pada sistem HM RSA dengan variasi tekanan awal pada akumulator (p_0)?
3. Bagaimana model dinamis seperempat kendaraan dengan penambahan HM RSA?
4. Bagaimana karakteristik dinamis dan energi listrik bangkitan pada sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HM RSA?

1.3 Batasan Masalah

Ada beberapa hal yang menjadi batasan dalam tugas akhir ini, yaitu:

1. Untuk simulasi, hanya menggunakan seperempat kendaraan (*quarter car*). Dan kendaraan yang digunakan adalah truk (*heavy truck*).
2. Fluida kerja pada silinder hidrolik diasumsikan *incompressible flow*.
3. Persamaan generator yang digunakan adalah persamaan generator yang telah dilinierkan.
4. Akumulator yang digunakan adalah *compressed gas accumulator*.
5. Spesifikasi daya maksimal yang dihasilkan generator adalah 100 watt.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui model dinamis sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal pada akumulator (p_0).
2. Untuk mengetahui karakteristik gaya redam dan energi listrik bangkitan pada sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal pada akumulator (p_0).
3. Untuk mengetahui model dinamis seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA.
4. Untuk mengetahui karakteristik dinamis dan energi listrik bangkitan pada sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA.

1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

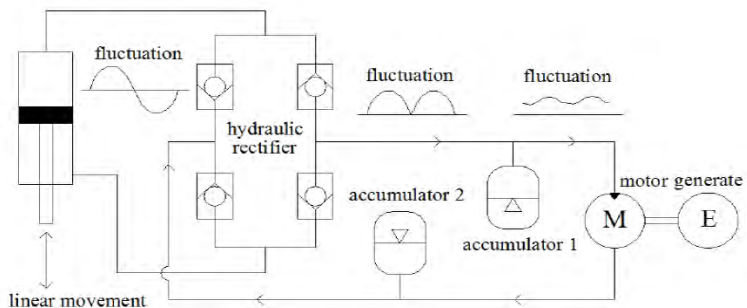
1. Memberikan data tentang model dinamis sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal pada akumulator (p_0).
2. Memberikan data tentang karakteristik gaya redam dan energi listrik bangkitan pada sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal pada akumulator (p_0).
3. Memberikan data tentang model dinamis seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA.
4. Memberikan data tentang karakteristik dinamis dan energi listrik bangkitan pada sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Suspensi Regeneratif

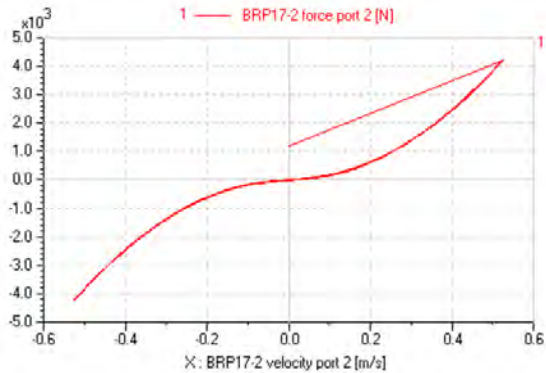
Hydraulic Electromagnetic energy-regenerative Shock Absorber (HESA)^[8] merupakan salah satu jenis *regenerative shock absorber* yang didesain oleh Xiaolin Zi dkk pada tahun 2013. Dalam HESA ini menggabungkan keunggulan dari sistem hidrolik (sebagai transmisi daya) dan sistem elektromagnetik (sebagai penghasil listrik), dan ini membuat HESA memiliki efisiensi energi regeneratif yang tinggi.



Gambar 2. 1 Skema dari HESA^[8]

Pada saat simulasi, penelitian ini menggunakan amplitude sebesar 100 mm dan frekuensi 1.67 Hz. Untuk diameter silinder dari *shock absorber* sebesar 50 mm dan untuk diameter batang piston sebesar 20 mm. Didapatkan grafik hubungan gaya redam dengan kecepatan pada gambar 2.2. Pada gambar tersebut, HESA dapat menghasilkan gaya redam yang besar dengan kecepatan piston yang kecil. Hal ini dikarenakan akumulator di HESA dapat memainkan peran penyearah yang dapat memperlancar aliran hidrolik, membuat aliran melalui motor dalam keadaan stabil.

Selain gaya redam yang besar, HESA dapat menghasilkan daya listrik bangkitan sebesar 1.4 kW.

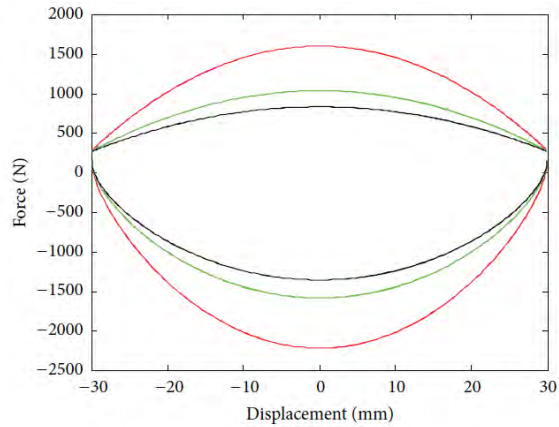


Gambar 2. 2 Grafik karakteristik gaya redam dari HESA^[8]

Untuk pemanfaatan getaran pada kendaraan bermotor saat melewati jalan yang tidak rata, pada tahun 2014, Han Zhang dkk mendesain suspensi menjadi *Hydraulic-Electricity Energy Regenerative Suspension* (HEERS)^[1]. HEERS ini terdiri dari beberapa komponen penting, yaitu silinder hidrolik, *check valve*, akumulator, motor hidrolik, pipa hidrolik, dan generator seperti pada gambar 2.3.

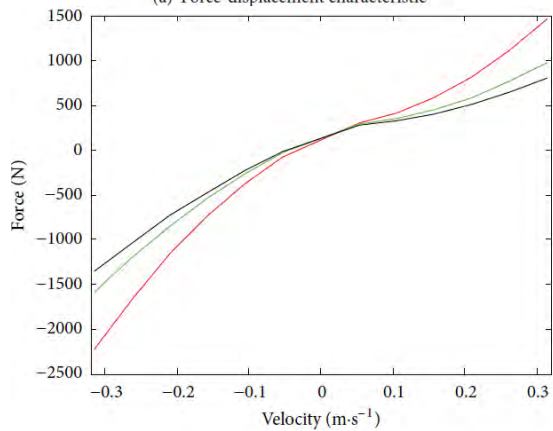
Pada saat kompresi, oli pada silinder peredam mengalir ke atas karena gerakan piston yang menekan silinder. Saat melewati titik C, minyak mengalir ke *check valve* 2 dikarenakan kondisi *check valve* 1 tertutup saat *check valve* 2 pada kondisi terbuka. Melewati titik A, minyak akan mengalir ke bagian dalam silinder, karena tekanan yang lebih tinggi pada pipa oli yang berada pada sisi kanan titik A selama ekspansi, dan tekanan yang lebih rendah pada bagian dalam silinder. Karena kontraksi rongga batang, oli yang terhalang ke silinder dalam dan mengalir melewati akumulator melalui titik B. Selama ekspansi, oli pada silinder peredam terdorong piston mengalir ke sisi kanan dan melalui titik A, karena *valve* 2 tertutup. Ketika melewati titik B, oli akan mengalir ke dalam motor hidrolik secara berangsur-angsur, karena pengisian akumulator selama kompresi dan generator digerakkan oleh motor hidrolik. Pada akhirnya oli mengalir melalui motor hidrolik kemudian masuk ke bagian atas silinder melewati *valve* 1.

Pada saat simulasi, HEERS dipasangkan pada kendaraan tipe SUV. Berikut grafik yang dihasilkan simulasi HEERS dengan variasi diameter dalam pipa hidrolik.



— 8 mm
— 10 mm
— 12 mm

(a) Force-displacement characteristic

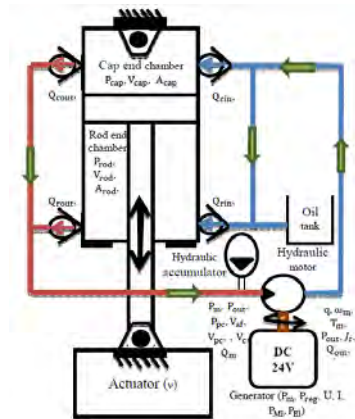


— 8 mm
— 10 mm
— 12 mm

(b) Force-velocity characteristic

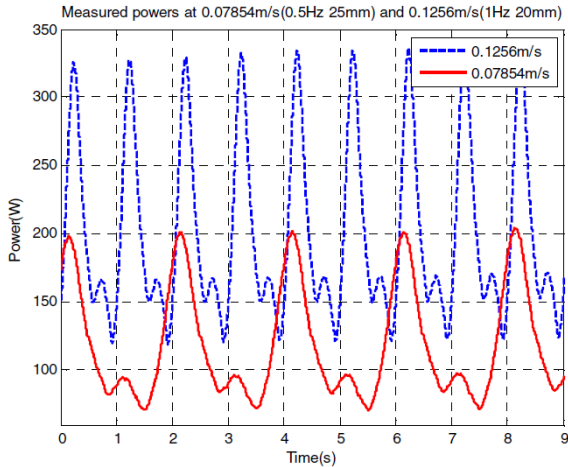
Gambar 2. 4 Pengaruh perbedaan diameter dalam pipa hidrolik^[1]

Prototype Regenerative Shock Absorber (RSA)^[2], yang dirancang oleh Ruichen Wang dkk pada penelitiannya pada tahun 2014, terdiri dari silinder hidrolik, empat buah *check valve*, akumulator hidrolik, motor hidrolik, generator, pipa, dan *oil tank*.



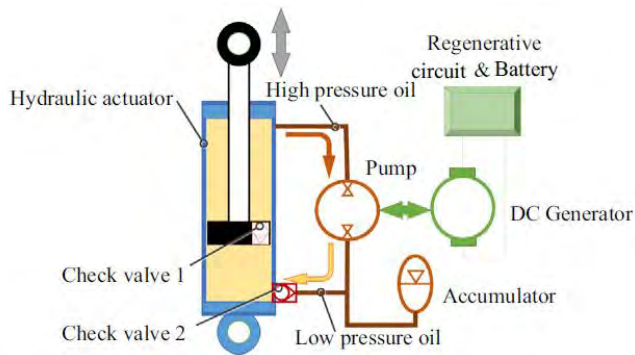
Gambar 2. 5 Skema dari RSA^[2]

Pada saat pengujian, input yang digunakan yaitu input *sinusoidal*. Ada dua variasi untuk input *sinusoidal*, yaitu 0.0785 m/s saat 0.5 Hz (25 mm *stroke*) dan 0.1256 m/s saat 1 Hz (20 mm *stroke*). Besar energi bangkitan yang dihasilkan dari RSA tersebut (gambar 2.6) saat 0.07854 m/s dan 0.1256 m/s rata-rata sebesar 118,2 W dan 201,7 W.



Gambar 2. 6 Grafik dari energi bangkitan yang dihasilkan oleh RSA^[2]

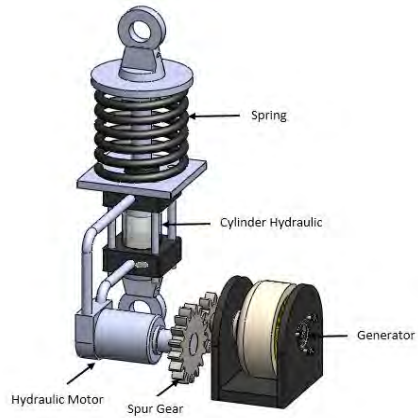
Dalam penelitian yang dilakukan oleh Yuxin Zhang dkk pada tahun 2014^[10], sistem suspensi terdiri dari aktuator hidrolik, pompa hidrolik, DC generator, akumulator, dua buah *check valve*, dan sirkuit regeneratif. Pada saat ekspansi, *check valve* 1 menutup dan *check valve* 2 terbuka, dan fluida bertekanan tinggi dari *rod chamber* mengalir melewati pompa hidrolik. Fluida bertekanan rendah mengalir ke *rodless chamber* melalui *check valve* 2, sementara itu, akumulator mengkompensasi rongga yang disebabkan oleh ekstraksi batang piston. Pada saat kompresi, *check valve* 1 terbuka dan *check valve* 2 tertutup, fluida dari *rodless chamber* mengalir ke dalam *rod chamber* melalui *check valve* 1. Karena *rod chamber* lebih kecil dari pada *rodless chamber*, fluida bertekanan tinggi akan meluap ke pompa hidrolik dan melewatinya. Fluida bertekanan rendah dari pompa hidrolik mengalir kembali ke akumulator.



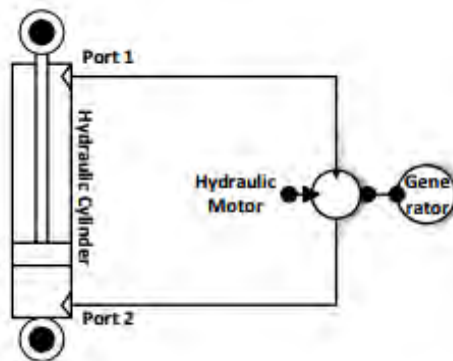
Gambar 2. 7 Skema untuk *hydraulic pumping regenerative suspension*^[10]

Pada saat simulasi, *hydraulic pumping regenerative suspension* diuji pada SUV dengan beban eksternal yang konstan 15Ω dan efisiensi hidrolis tercapai hingga 73%. Melalui *GA optimization*, daya optimal yang dapat dihasilkan sebesar 33,4 W dengan frekuensi 1,67 Hz dan amplitudo 50 mm.

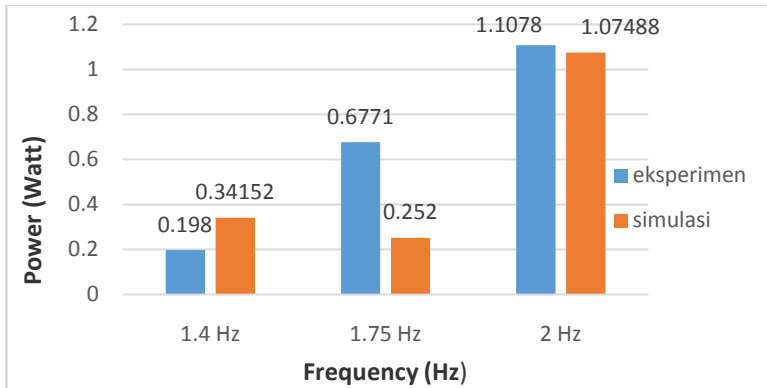
Pada tahun 2014, Kaspul Anuar^[5], salah satu mahasiswa Teknik Mesin ITS, merancang *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA). Prinsip kerja dari alat ini adalah memanfaatkan energi kinetik pada gerakan suspensi kendaraan. Energi tersebut ditransfer ke sebuah motor hidrolis. Gaya yang ditransfer dari motor hidrolis kemudian ditransmisikan oleh susunan roda gigi yang berfungsi untuk meningkatkan putaran generator. Putaran generator tersebut akan menghasilkan energi bangkitan. Daya yang dihasilkan HMRSA ini berkisar antara 0.024 watt sampai 1.1078 watt dengan model seperempat kendaraan seperti pada gambar 2.10.



Gambar 2. 8 Konstruksi HMRSA dari Kaspul Anuar ^[5]



Gambar 2. 9 Prinsip kerja HMRSA dari Kaspul Anuar ^[5]



Gambar 2. 10 Energi bangkitan dari HMRSA^[5]

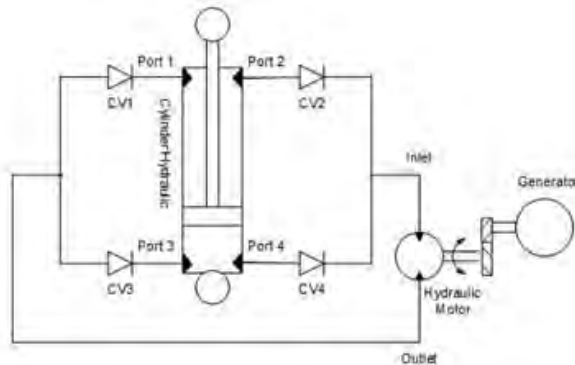
Tabel 2. 1 Perbandingan daya yang dihasilkan HMRSA^[5]

Frekuensi	Daya Simulasi	Daya Eksperimen	Error
1.4 Hz	0.34152	0.198	72%
1.75 Hz	0.252	0.67	62,3%
2 Hz	1.07488	1.1078	2,9%

Dari grafik gambar 2.10, terlihat selisih daya yang dihasilkan baik pada simulasi maupun eksperimen pada masing – masing frekuensi terlihat tidak begitu jauh, terutama pada frekuensi 2 Hz. Pada tabel 2.1 terlihat *error* yang terjadi pada simulasi masih besar terutama pada frekuensi 1.4 Hz yaitu sebesar 72 %. Besarnya *error* yang terjadi disebabkan oleh beberapa parameter pada simulasi yang didapat dengan asumsi seperti parameter pada motor hidrolik. Yaitu berupa parameter momen inersia gear motor hidrolik dan nilai redaman ball bearing pada motor hidrolik. Proses pendekatan asumsi dalam mendapatkan nilai parameter inilah yang diduga kuat sangat mempengaruhi besarnya *error* yang terjadi pada simulasi.

Pengembangan HMRSA yang dilakukan pada tahun 2015 oleh Chardian Bayu Prabowo^[4], salah satu mahasiswa Teknik

Mesin ITS, adalah dengan perubahan rangkaian hidrolis dan penambahan mekanisme *check valves* agar putaran motor hidrolis menjadi searah sehingga mengurangi *losses* akibat putaran yang tidak searah. Pengembangan lain adalah mengganti generator yang digunakan. Generator yang digunakan pada penelitian sebelumnya adalah generator pada motor jupiter MX, sedangkan generator yang digunakan pada penelitian ini adalah generator PMG-100. Penggantian generator dimaksudkan agar daya yang dihasilkan HM RSA lebih besar dari penelitian sebelumnya. Hal ini didasarkan pada spesifikasi dari generator tersebut. Generator PMG-100 bekerja pada putaran rendah, sedangkan generator motor jupiter MX bekerja pada putaran tinggi. Adapun komponen lain yang digunakan pada HM RSA ini adalah motor hidrolis. Motor hidrolis yang digunakan adalah tipe BMM 8. Perbandingan roda gigi adalah 2.65, dengan diameter roda gigi pada motor hidrolis 115.6 mm dan roda gigi pada generator 43.6 mm.



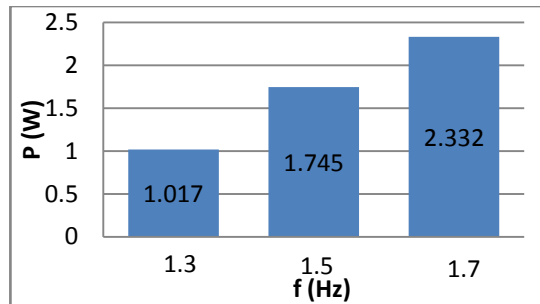
Gambar 2. 11 Skema HM RSA setelah pengembangan ^[4]

Adapun perhitungan energi bangkitan yang dihasilkan oleh HM RSA dapat dilihat pada tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Perhitungan energi bangkitan HMRSA^[4]

Frekuensi (Hz)	RMS Voltase (Volt)	Arus (Ampere)	Daya Bangkitan (Watt)
1.3	4.623	0.22	1.017
1.5	7.271	0.24	1.745
1.7	7.776	0.30	2.332

Adapun diagram energi bangkitan yang dihasilkan oleh HMRSA dapat dilihat pada gambar 2.12.

Gambar 2. 12 Diagram batang energi bangkitan HMRSA^[4]

Dari gambar 2.12 diatas dapat dilihat energi bangkitan yang dihasilkan oleh HMRSA. Pada frekuensi 1.3 Hz daya yang dihasilkan HMRSA adalah 1.017 W. Pada frekuensi 1.5 Hz daya yang dihasilkan HMRSA adalah 1.745 W. Pada frekuensi 1.7 Hz daya yang dihasilkan HMRSA adalah 2.332 W. Artinya, semakin besar frekuensi maka semakin besar pula daya bangkitan yang dihasilkan oleh HMRSA. Hal ini sesuai dengan teori. Berdasarkan persamaan $\omega = 2\pi f$, persamaan $E_{\max} = NBA\omega$ dan persamaan $P = E_{\max} \cdot I$, semakin besar frekuensi (f) maka semakin besar kecepatan sudut (ω). Semakin besar kecepatan sudut (ω), maka semakin besar voltase bangkitan (E_{\max}). Semakin besar

voltase bangkitan (E_{\max}), maka semakin besar daya bangkitan (P) yang dihasilkan oleh HM RSA.

2.2 Redaman

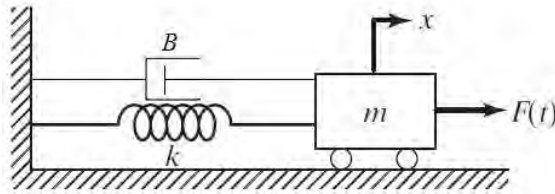
Pada umumnya, energi getaran diubah menjadi panas atau suara. Karena pengurangan energi, respon (seperti perpindahan pada sistem) akan menurun. Mekanisme dari energi getaran diubah menjadi panas atau suara diketahui sebagai redaman (*damping*). Walaupun jumlah energi yang diubah menjadi panas atau suara relatif kecil, pertimbangan redaman menjadi penting untuk prediksi yang akurat dari respon getaran sistem^[9]. Berikut beberapa jenis redaman:

- ***Viscous Damping***^[9] merupakan mekanisme redaman yang paling sering digunakan dalam analisa getaran. Saat sistem mekanis bergetar dalam media fluida (seperti udara, gas, air, atau oli), perlawanan dari fluida terhadap sistem inilah yang menyebabkan energi terdisipasi. Jumlah energi yang terdisipasi bergantung beberapa factor, yaitu bentuk dan ukuran massa yang bergetar, viskositas fluida, frekuensi getaran, dan kecepatan massa tersebut bergetar. Dalam *viscous damping*, gaya redam sebanding dengan kecepatan massa bergetar. Contoh dari *viscous damping*: (1)film cairan antara permukaan geser, (2)aliran cairan di sekitar piston di dalam silinder, (3)aliran fluida melalui lubang (*orifice*), dan (4)film cairan di sekitar sebuah jurnal di bantalan (*bearing*).
- ***Coulomb or Dry-Friction Damping***^[9]. Gaya redam besarnya konstan tetapi berlawanan arah dengan gerak massa yang bergetar. Hal ini disebabkan oleh gesekan antara menggosok permukaan yang baik kering atau pelumasan cukup.
- ***Material or Solid or Hysteretic Damping***^[9]. Ketika material berdeformasi, energi akan diserap dan terdisipasi oleh material. Hal ini disebabkan karena gesekan antara bagian dalam yang slip atau bergeser karena deformasi. Saat sebuah

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + kx = 0 \quad (2.1)$$

- **Forced vibration**^[9], terjadi jika sistem mekanik terkena gaya luar.

➤ *Forced vibration with damping*

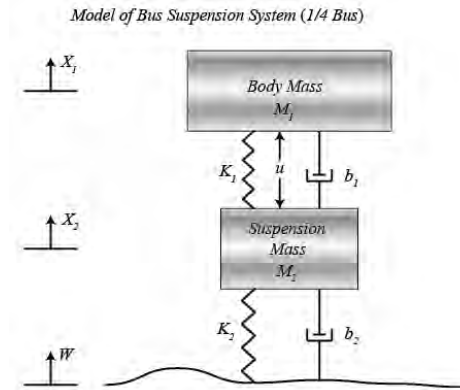


Gambar 2. 15 Contoh sederhana dari sistem *forced vibration with damping*

Berikut turunan persamaan dari gambar 2.15:

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + kx = F(t) \quad (2.2)$$

Merancang sistem suspensi otomotif adalah masalah yang menarik dan menantang. Ketika sistem suspensi dirancang, model seperempat kendaraan (salah satu dari empat roda) digunakan untuk menyederhanakan masalah dengan sistem pegas-peredam. Pada gambar 2.16 merupakan sistem suspensi aktif.



Gambar 2. 16 Gambar seperempat bus^[16]

Persamaan gerak dari gambar 2.16^[16]:

$$M_1 \ddot{x}_1 = -b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) \quad (2.3)$$

$$M_2 \ddot{x}_2 = b_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) + b_2(\dot{W} - \dot{x}_2) + k_2(W - x_2) \quad (2.4)$$

Kemudian dari persamaan tersebut, diubah menjadi bentuk *state variable equation*.

$$\dot{x}_1 = v_1$$

$$\dot{x}_2 = v_2$$

$$\dot{W} = w$$

$$\dot{v}_1 = \frac{1}{M_1} [-b_1(v_1 - v_2) - k_1(x_1 - x_2)] \quad (2.5)$$

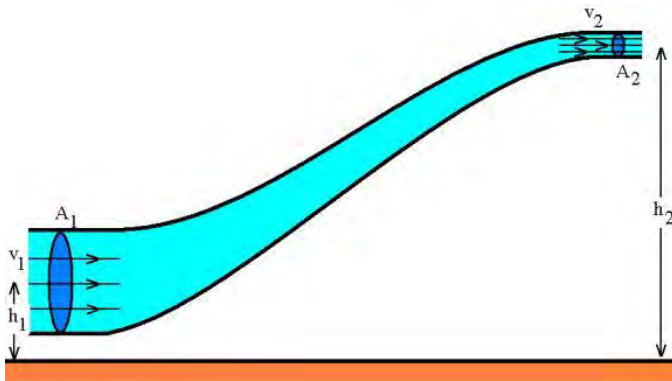
$$\dot{v}_2 = \frac{1}{M_2} [b_1(v_1 - v_2) + k_1(x_1 - x_2) + b_2(w - v_2) + k_2(W - x_2)] \quad (2.6)$$

2. 4 Persamaan Pada Mekanisme Hidrolik

2.4.1. Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli menyatakan bahwa jumlah energi pada suatu titik di dalam suatu aliran tertutup sama besarnya dengan jumlah energi di titik lain pada jalur aliran yang sama. Prinsip ini diambil dari nama ilmuwan Belanda/Swiss yang bernama Daniel Bernoulli.

Dalam bentuknya yang sudah disederhanakan, secara umum terdapat dua bentuk persamaan Bernoulli; yang pertama berlaku untuk aliran tak-termampatkan (incompressible flow), dan yang lain adalah untuk fluida termampatkan (compressible flow). Berikut ini persamaan Bernoulli untuk aliran yang tak termampatkan (incompressible flow):



Gambar 2. 17 Penerapan hukum Bernoulli pada sebuah pipa

Persamaan Bernoulli:

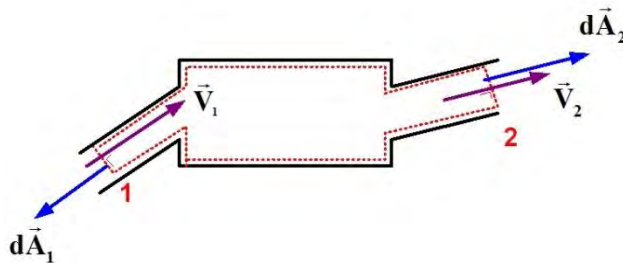
$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 \quad (2. 7)$$

Keterangan:

p_1 : Tekanan fluida pada kondisi 1 (N/m^2)

- p_2 : Tekanan fluida pada kondisi 2 (N/m^2)
 v_1 : Kecepatan aliran fluida pada kondisi 1 (m/s)
 v_2 : Kecepatan aliran fluida pada kondisi 2 (m/s)
 h_1 : Tinggi pipa kondisi 1 (m)
 h_2 : Tinggi pipa kondisi 2 (m)
 g : gravitasi bumi (9.8 m/s^2)

2.4.2. Konservasi Massa pada Mekanika Fluida



Gambar 2. 18 Ilustrasi untuk aliran dalam suatu kontrol volume

$$\left. \frac{dM}{dt} \right)_{system} = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.9)$$

karena diasumsikan aliran incompressible, $\rho = \text{konstan}$, sehingga:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \rho \int_{CS} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\rho \int_{CS} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\int_{CS} \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (2.10)$$

dimana ρ : massa jenis fluida (kg/m^3)
 V : volume fluida (m^3)

\bar{V} : kecepatan (m/s)
 A : luas area (m²)

2.4.3. Head Loss

Head loss^[12] merupakan kerugian energi per satuan berat fluida dalam aliran cairan dalam sistem perpipaan. *Total head loss* merupakan penjumlahan dari *major* dan *minor head loss*.

- **Major head loss**, merupakan kerugian energi dikarenakan efek gesekan pada *fully developed flow* di dalam pipa. Rumus untuk *major head loss*^[12].

$$h_l = \left(\frac{64}{Re}\right) \frac{L}{2d_{tube}} \dot{x}^2 \quad (2.11)$$

$$\text{dengan } Re = \frac{d_{tube}}{v} \dot{x} \quad (2.12)$$

Substitusi persamaan (2.12) ke persamaan (2.11)

$$h_l = \left(\frac{64v}{d_{tube} \dot{x}}\right) \frac{L}{2d_{tube}} \dot{x}^2$$

sehingga rumus *major head loss* menjadi:

$$h_l = \frac{32Lv}{d_{tube}^2} \dot{x} \quad (2.13)$$

dimana

h_l	: <i>major head loss</i>
L	: panjang pipa (m)
d_{tube}	: diameter pipa (m)
\dot{x}	: kecepatan aliran (m/s)
Re	: <i>Reynold number</i>
v	: viskositas kinematik fluida (m ² /s)

Nilai friction factor dipengaruhi oleh nilai Reynold number (Re) (persamaan (2.12)) dan kekasaran permukaan pipa (e). Dari nilai Re dapat ditentukan jenis aliran dari fluida, apabila $Re < 2300$ aliran digolongkan

sebagai aliran laminar, sedangkan apabila $Re > 2300$ maka aliran digolongkan sebagai aliran turbulen.

- **Minor head loss**, merupakan kerugian energi yang diakibatkan karena pintu masuk, fitting, perubahan luasan, dsb. Rumu untuk *minor head loss*^[12]:

$$h_{lm} = K \frac{\bar{v}^2}{2} \quad (2.14)$$




dimana h_{lm} : *minor head loss*
 K : *loss coefficient*

Berikut ini adalah penjelasan tentang fenomena yang dapat menimbulkan *minor head loss*:

➤ *Inlets dan Exits*^[12]

Jika terdapat ujung tajam pada sudut inlet, maka akan terjadi separasi aliran yang menimbulkan *vena contracta*, yang menyebabkan hilangnya *mechanical energy*. Sekalipun sudut pada *inlet* maupun *exit* di buat bulat (*rounded*), tetap terjadi fenomena *vena contracta* yang kecil. Dari tabel 2.3 dapat dilihat besarnya koefisien head loss minor pada beberapa bentuk *inlet/exit*.

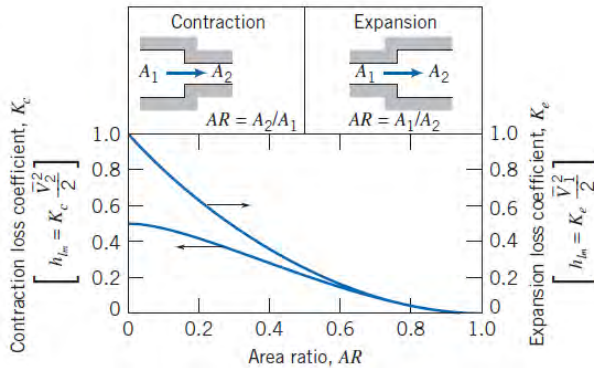
Tabel 2. 3 *Minor Loss Coefficient* untuk pintu masuk pada pipa^[12]

Entrance Type	Minor Loss Coefficient, K^a				
Reentrant		0.78			
Square-edged		0.5			
Rounded		$\frac{r/D}{K}$	0.02	0.06	≥ 0.15
			0.28	0.15	0.04

^aBased on $h_{lm} = K(\bar{V}^2/2)$, where \bar{V} is the mean velocity in the pipe.

➤ *Enlargements dan Contractions*^[12]

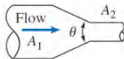
Losses ini terjadi karena adanya perubahan area penampang (membesar ataupun mengecil) secara tiba – tiba. Untuk mengetahui besarnya koefisien headloss minor, dapat dilihat pada gambar 2.19.



Gambar 2. 19 *Loss coefficient* untuk aliran melalui perubahan *sudden area*^[12]

Losses yang diakibatkan oleh perubahan luas penampang, dapat diantisipasi dengan cara memasang *nozzle* maupun *diffuser* diantara dua bagian dari pipa lurus yang terjadi luas perubahan penampang . Dari table 2.4 dapat ditentukan besarnya sudut dari diffuser maupun *nozzle* yang dibutuhkan.

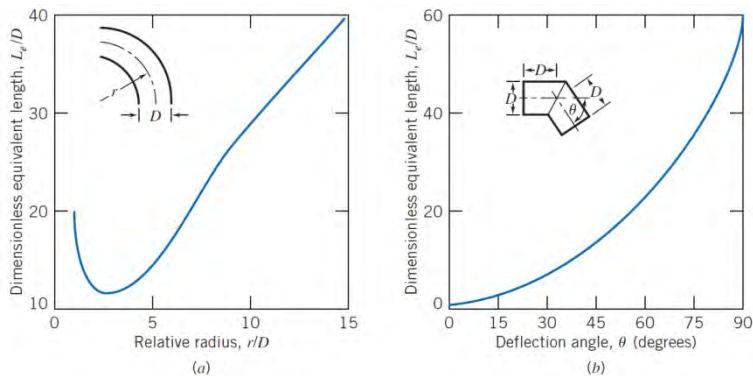
Tabel 2. 4 *Loss coefficient* untuk kontraksi bertahap: saluran bulat dan persegi panjang^[12]

	Included Angle, θ , Degrees							
	A_2/A_1	10	15–40	50–60	90	120	150	180
	0.50	0.05	0.05	0.06	0.12	0.18	0.24	0.26
	0.25	0.05	0.04	0.07	0.17	0.27	0.35	0.41
	0.10	0.05	0.05	0.08	0.19	0.29	0.37	0.43

Note: Coefficients are based on $h_{L_c} = K(V_2^2/2)$.

➤ *Pipe bend (belokan)*^[12]

Head loss akibat bending (belokan) pada pipa mempunyai nilai yang lebih besar dari pada *head loss* yang terjadi pada aliran *fully developed* pada pipa lurus pada panjang yang sama. Pada gambar 2.20 dan tabel 2.5 dapat ditentukan besar L_e/D yang digunakan untuk menghitung besarnya *head loss* minor yang terjadi.



Gambar 2. 20 *Representative total resistance* (L_e/D) untuk (a) pipa belokan (*bend*) dan siku bergelang (*flanged elbow*) 90° dan (b) belokan *miter* (*miter bend*)^[12]

Tabel 2. 5 *Representative dimensionless equivalent lengths (L_e/D) untuk katup dan fitting*^[12]

Fitting Type	Equivalent Length, ^a L_e/D
Valves (fully open)	
Gate valve	8
Globe valve	340
Angle valve	150
Ball valve	3
Lift check valve: globe lift	600
angle lift	55
Foot valve with strainer: poppet disk	420
hinged disk	75
Standard elbow: 90°	30
45°	16
Return bend, close pattern	50
Standard tee: flow through run	20
flow through branch	60

^aBased on $h_{L_e} = f(L_e/D)(\bar{V}^2/2)$.

2. 5 Akumulator Hidrolik

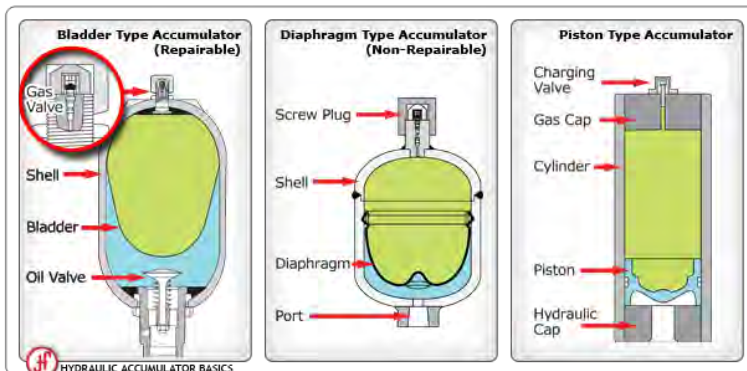
Akumulator hidrolik merupakan salah satu alat peredam kejut (*shock absorber*). Namun, alat ini juga dapat digunakan sebagai penyimpan energi dengan menggunakan gas bertekanan (*compressed gas*). Tipe-tipe pada akumulator:

- *Tower*
- *Raised weight*
- *Compressed gas: bladder, diaphragm, piston, metal bellow*
- *Spring*

Tabel 2. 6 Karakteristik untuk tipe-tipe akumulator^[7]

	Diaphragm accu. welded	Diaphragm accu. screwed	Bladder accu.	Piston accu.
Size [l]	0.2 – 4	0.1 – 10	0.2 – 450	0.5 – 2500
Max. pressure [bar]	250 (350)	750	1000	1000
Flow rate [l/s]	< 150	< 150	< 140	< 400
Max pressure ratio	1 : (6...8)	1 : 10	1 : 4	1 : ∞∞
Cost per volume [€/l]	Sangat rendah	Rendah hingga mendekati rata-rata	Rendah hingga tinggi (tergant ung pada ukuran akumula tor)	Rata-rata hingga tinggi
Response characteri stic	Sangat bagus	Sangat bagus	Sangat bagus	Bagus
Cocok untuk	sistem suspensi, denyut redaman (<i>pulsation damping</i>).	tekanan operasi yang tinggi.	denyut redaman dalam sistem volume besar	Rasio tekanan dan laju aliran tinggi, misalnya, untuk peralatan crash test

Pada umumnya, sistem hidrolis menggunakan akumulator tipe *compressed gas*: *diaphragm*. Akumulator diafragma biasanya digunakan dalam suspensi hydropneumatic karena (seperti yang ada pada table 2.6) akumulator tipe ini mempunyai rasio tekanan baik dalam kombinasi dengan yang terbaik biaya /volume ratio, terutama ketika versi dilas digunakan.



Gambar 2. 21 *Compressed Gas Accumulator*

Akumulator dapat digunakan pada beberapa situasi, diantaranya:

- **Emergency and safety:** akumulator terus menerus berada di bawah tekanan saat terjadi kegagalan daya listrik karena dapat memberikan aliran dan tekanan untuk melakukan fungsi tambahan atau menyelesaikan siklus mesin.
- **Shock or pulsation damping:** akumulator dapat digunakan untuk meredam lonjakan tekanan dari ujung *sudden valve*, denyutan dari pompa atau reaksi beban dari *sudden movement*, bagian yang terhubung ke silinder hidrolis.
- **Leakage compensation:** akumulator dapat digunakan untuk dapat digunakan untuk mempertahankan tekanan dan

mengganti cairan yang hilang akibat kebocoran internal pada komponen sistem termasuk silinder dan katup.

- **Thermal expansion:** akumulator dapat menyerap perbedaan tekanan yang disebabkan oleh variasi suhu dalam sistem hidrolik tertutup.

Rumus yang digunakan untuk akumulator hidrolik ^[1]:

- Sebagai *spring*

$$p = p_0 \left[\frac{V_0}{V_0 - (A_{\text{relatif}})x} \right]^n \quad (2.15)$$

- Sebagai *damper*

$$p = p_0 \quad (2.16)$$

dimana

p	: tekanan pada akumulator
p ₀	: tekanan awal pada akumulator
V ₀	: volume awal pada akumulator
x	: perpindahan dari piston pada silinder hidrolik
n	: <i>polytrophic gas index</i>
A _{relatif}	: luas pada silinder hidrolik
*saat kompresi (A = luasan ruang rod piston – luasan ruang permukaan piston) dan sebaliknya untuk ekspansi.	

2.6 Motor Hidrolik

Motor hidrolik adalah sebuah aktuator mekanik yang mengkonversi aliran dan tekanan hidrolik menjadi torsi atau tenaga putaran. Alat ini menjadi satu bagian dari sebuah sistem hidrolik selain silinder hidrolik. Motor hidrolik berkebalikan fungsi dengan pompa hidrolik. Jika pompa hidrolik berfungsi untuk menghasilkan tekanan dan aliran tertentu pada suatu sistem hidrolik, maka motor hidrolik bertugas mengkonversi kembali tekanan hidrolik menjadi tenaga putar. Motor hidrolik dapat

berkerja pada dua arah putaran motor sesuai dengan kebutuhan penggunaan. Rumus yang digunakan untuk motor hidrolik ^[1]:

$$\omega = \frac{Q_m \eta_v}{q} \quad (2.17)$$

$$T_m = \Delta p_m q \eta_m \quad (2.18)$$

dimana ω : kecepatan putaran motor hidrolik (rad/s)

T_m : torsi motor hidrolik (N.m)

Q_m : debit aliran fluida yang masuk ke motor hidrolik (m³/s)

q : perpindahan motor hidrolik (cc/rev)

p_m : tekanan pada motor hidrolik (Pa)

η_v : efisiensi volumetrik

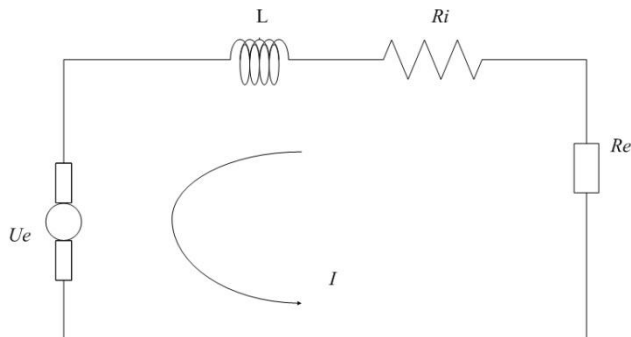
η_m : efisiensi mekanik

2.7 Generator

Generator merupakan alat yang dapat merubah energi mekanik menjadi energi listrik biasanya menggunakan induksi elektromagnetik. Sebagaimana generator listrik bekerja, prinsipnya berkebalikan dengan motor listrik. Berdasarkan arus yang dihasilkan. Generator dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu generator AC dan generator DC. Generator AC menghasilkan arus bolak-balik (AC) dan generator DC menghasilkan arus searah (DC).

- Generator AC, bagian utama terdiri atas: magnet permanen (tetap), kumparan (solenoida), cincin geser, dan sikat. Pada generator, perubahan garis gaya magnet diperoleh dengan cara memutar kumparan di dalam medan magnet permanen. Karena dihubungkan dengan cincin geser, perputaran kumparan menimbulkan GGL induksi AC. Oleh karena itu, arus induksi yang ditimbulkan berupa arus AC.

- Generator DC, terdiri dua bagian, yaitu stator, yaitu bagian mesin DC yang diam/tidak bergerak, dan bagian rotor, yaitu bagian mesin DC yang berputar. Bagian stator terdiri dari: rangka motor, belitan stator, sikat arang, bearing dan terminal box. Sedangkan bagian rotor terdiri dari: komutator, belitan rotor, kipas rotor dan poros rotor. Prinsip kerja generator DC sama dengan generator AC. Namun, pada generator DC arah arus induksinya tidak berubah. Hal ini disebabkan cincin yang digunakan pada generator DC berupa cincin belah (komutator).



Gambar 2. 22 Skema RL Circuit untuk Generator

Persamaan elektrik pada generator dengan menggunakan *Kirchhoff's voltage law*.

$$(R_e + R_i)I + L \frac{dI}{dt} = V_e \quad (2. 19)$$

$$\text{dengan, } V_e = 2NBl a \dot{\theta} = \alpha \dot{\theta} \quad (2. 20)$$

karena induktansi diabaikan, maka persamaan tersebut menjadi:

$$(R_e + R_i)I + L \frac{dI}{dt} = V_e$$

sehingga persamaan menjadi:

$$(R_e + R_i)I = \alpha \dot{\theta}$$

$$I = \frac{\alpha}{(R_e + R_i)} \dot{\theta} = \beta \dot{\theta} \quad (2. 21)$$

dimana V_e : *electromotive voltage* (Volt)
 L : induktansi internal (Henries)
 I : arus (Ampere)

Rumus torsi elektrik pada generator:

$$T_e = F_e a$$

$$T_e = (NBI) a$$

$$T_e = NBI(\beta \dot{\theta}) a$$

$$T_e = NBla\beta \dot{\theta} = c_{Te} \dot{\theta} \quad (2. 22)$$

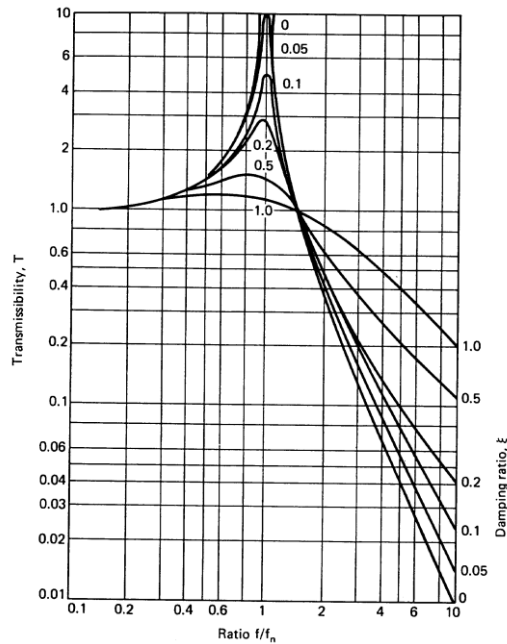
dimana T_e : torsi elektrik (N.m)
 N : jumlah lilitan
 B : induksi magnetik (Tesla)
 l : panjang kumparan (m)
 a : jarak kepada kawat (m)
 c_{Te} : koefisien torsi elektrik (N.m.s/rad)

2. 8 *Displacement Transmissibility*

Displacement transmissibility merupakan seberapa besar repon gerakan yang ditransmisikan dari input jalan ke massa kendaraan dengan variasi frekuensi saat berkendara. Dan dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$T = \frac{X}{Y} = \frac{\text{input displacement}}{\text{output displacement}}$$

$$T = \frac{X}{Y} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta r)^2}{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (2. 23)$$



Gambar 2. 23 Grafik *displacement transmissibility*

Catatan:

1. Nilai T adalah *unity* saat $r = 0$ dan mendekati *unity* untuk nilai-nilai kecil r
2. Untuk sistem *undamped* ($\zeta = 0$), $T \rightarrow \infty$ saat resonansi ($r = 1$)
3. Nilai T lebih kecil dari *unity* ($T < 1$) untuk nilai $r > \sqrt{2}$ (untuk setiap jumlah redaman ζ)
4. Nilai T *unity* untuk semua nilai ζ saat $r = \sqrt{2}$
5. Untuk $r < \sqrt{2}$, semakin kecil *damping ratio* menyebabkan semakin besar nilai T . Sedangkan $r > \sqrt{2}$, semakin kecil *damping ratio* menyebabkan semakin kecil nilai T .

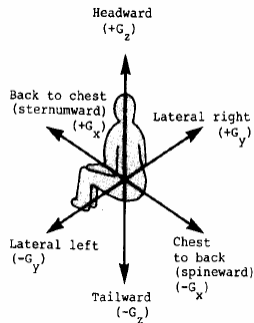
6. *Displacement transmissibility*, T , mencapai maksimum untuk $0 < \zeta < 1$ saat *frequency ratio* $r = r_m < 1$

$$r_m = \frac{1}{2\zeta} \left[\sqrt{1 + 8\zeta^2} - 1 \right]^{1/2} \quad (2.24)$$

2.9 Pengaruh Percepatan Kendaraan terhadap Kenyamanan Pengendara

Gerakan utama yang dialami pengemudi selama mengemudi adalah berupa percepatan atau perlambatan dan getaran. Unit dasar yang digunakan sebagai ukuran dari percepatan yang dialami manusia adalah berbasis pada gaya gravitasi yang diringkas G . Seseorang yang jatuh bebas dimana percepatan jatuhnya adalah $9,81 \text{ m/s}^2$ dikatakan mengalami percepatan sebesar 1 G . Toleransi manusia terhadap percepatan ditunjukkan pada gambar 2.23. Gambar tersebut menunjukkan level percepatan rata-rata untuk bermacam arah gerakan yang mampu ditahan oleh tubuh manusia

Informasi ketahanan badan manusia terhadap percepatan merupakan hal yang sangat penting sebagai referensi dalam perancangan ketahanan bodi kendaraan terhadap *impact*. Jika pada saat kendaraan mengalami *impact* dimana pengemudi atau penumpang mendapat percepatan atau perlambatan melebihi yang mampu didukung oleh badan, maka akan dapat membahayakan pengemudi dan penumpang kendaraan tersebut.



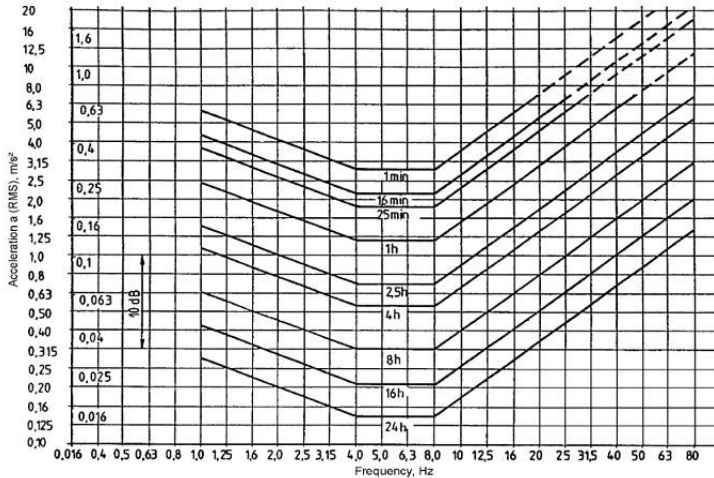
Human Tolerance Limits

Direction of Accelerative Force	Occupant's Inertial Response	Tolerance Level
Headward (+G _z)	Eyeballs Down	20-25 G
Tailward (-G _z)	Eyeballs Up	15 G
Lateral Right (+G _y)	Eyeballs Left	20 G
Lateral Left (-G _y)	Eyeballs Right	20 G
Back to Chest (+G _x)	Eyeballs Out	45 G
Chest to Back (-G _x)	Eyeballs In	45 G

Note: Reference: Crash Survival Design Guide, TR 79-22.
(0.10 Second time duration of crash pulse; full restraint)

Gambar 2. 24 Ketahanan badan manusia terhadap percepatan linier yang dapat diterima

Untuk kriteria ketahanan pengendara berdasarkan besar percepatan menurut standart ISO 2631, ditampilkan pada gambar 2.25.



Gambar 2. 25 Grafik percepatan RMS berdasarkan ISO 2631^[20]

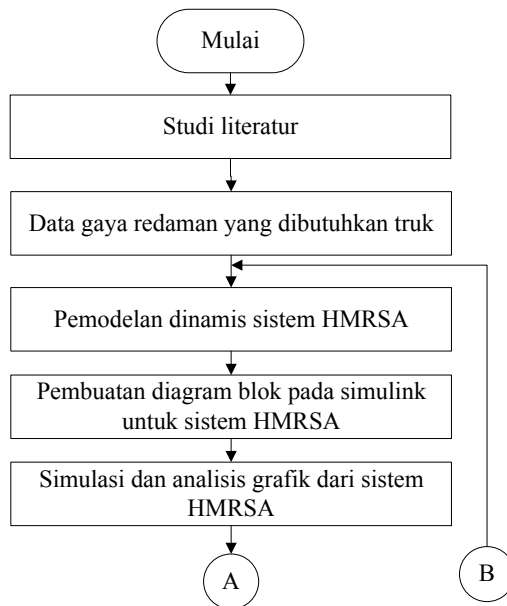
Selain berdasarkan kenyamanan, acuan baik tidaknya suspensi kendaraan juga dilihat berdasarkan kenyamanan. Ditinjau dari segi keamanan, suspensi dikatakan relatif aman jika roda dan permukaan jalan melekat dengan baik atau diusahakan defleksi pada roda seminimal mungkin^[17]. Defleksi maksimum dari suspensi depan sebesar 10 cm, sedangkan untuk suspensi belakang maksimum sebesar 12 cm^[18].

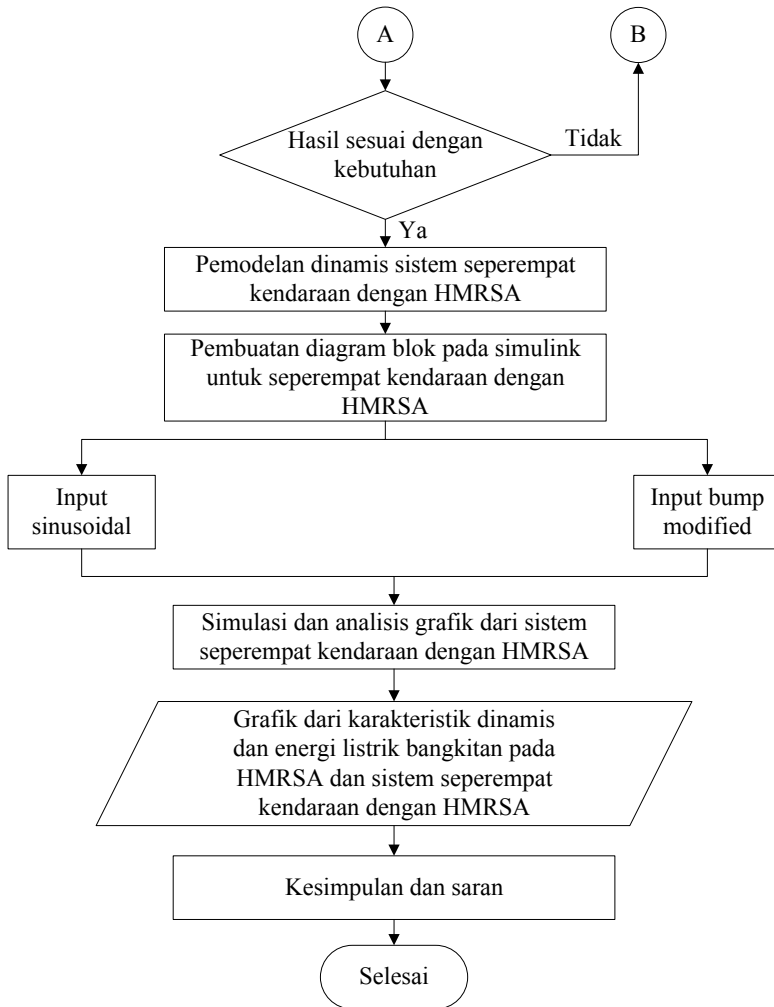
BAB III

METODOLOGI

3.1 Metodologi Penelitian

Penulisan tugas akhir ini dilakukan untuk mengetahui respon dinamis berupa perpindahan, kecepatan, dan percepatan terhadap sistem *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HMRSA). Dalam proses analisis dilakukan beberapa langkah yang ditunjukkan oleh diagram alir pada gambar 3.1.





Gambar 3. 1 Diagram alir penyelesaian tugas akhir

Metode pelaksanaan tugas akhir ini secara umum ditunjukkan pada gambar 3.1, dimulai dari studi literature

mengenai HM RSA dan akumulator hidrolik. Selanjutnya dilanjutkan dengan pemodelan fisik dan matematis untuk sistem HM RSA. Kemudian membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. Langkah selanjutnya adalah membuat blok diagram pada MATLAB Simulink. Dan dari Simulink tersebut, didapatkan grafik karakteristik gaya redaman dan energi bangkitan dengan variasi tekanan awal akumulator dari sistem HM RSA. Untuk selanjutnya, sistem HM RSA dipasang pada seperempat kendaraan dengan langkah yang sama, yaitu pertama dengan membuat model fisik dan matematis. Dilanjutkan dengan membuat persamaan gerak. Kemudian membuat blok diagram dengan input *sinusoidal* dan *bump modified*. Dari simulasi tersebut didapatkan grafik karakteristik dinamis dan energi bangkitan dari sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HM RSA. Setelah itu analisis grafik tersebut dan langkah terakhir, yaitu membuat kesimpulan berdasarkan hasil yang didapat dan memberikan saran untuk penelitian selanjutnya.

3.1.1 Tahap Studi Literatur

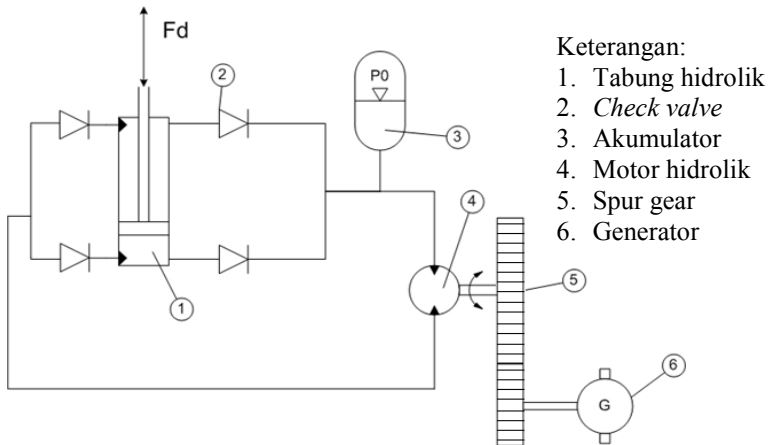
Dalam penulisan tugas akhir ini diperlukan refrensi-refrensi yang dapat menunjang dalam menganalisis sistem *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HM RSA). Oleh karena itu, dilakukan studi literatur untuk menambah wawasan, pengetahuan, dan landasan mengenai permasalahan yang akan dibahas. Adapun materi dari studi literatur yang mendukung dalam penulisan Tugas Akhir ini yaitu mekanika getaran dasar, pemodelan sistem dinamis, sistem hidrolik, akumulator hidrolik, serta pembuatan blok diagram pada MATLAB Simulink. Sedangkan studi lapangan yang dilakukan meliputi penentuan nilai parameter HM RSA yang digunakan dalam pemodelan dan simulasi sistem. Nilai parameter tersebut adalah berupa data teknis dari RSA yang meliputi dimensi dan massa sistem seperempat kendaraan, komponen hidrolik berupa silinder hidrolik, pipa, akumulator hidrolik, motor hidrolik, sepasang *spur gear*, dan generator elektromagnetik.

Referensi untuk studi literatur didapat dari buku, jurnal-jurnal ilmiah, maupun penelitian-penelitian terdahulu yang berkaitan. Sedangkan studi lapangan didapat dari data hasil penelitian oleh kelompok yang membuat perancangan alat terkait.

3.2 Pemodelan dan Simulasi Sistem HM RSA

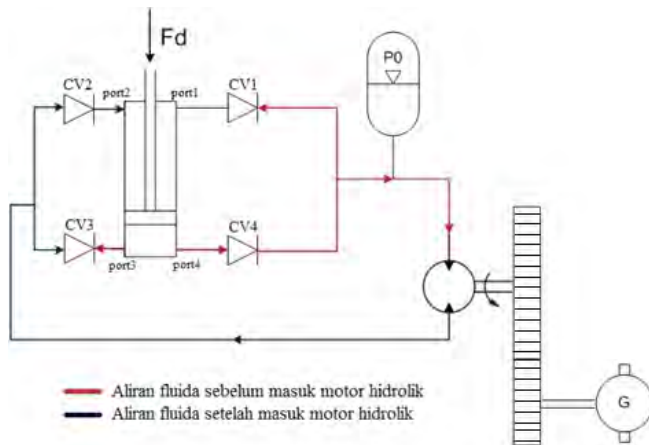
3.2.1 Pemodelan Fisik Sistem HM RSA

Dalam tugas akhir ini akan dianalisis karakteristik gaya redaman dan energi bangkitan dari sistem HM RSA dengan input *sinusoidal*. Berikut pemodelan fisik sistem tersebut:



Gambar 3. 2 Model fisik rancangan sistem HM RSA

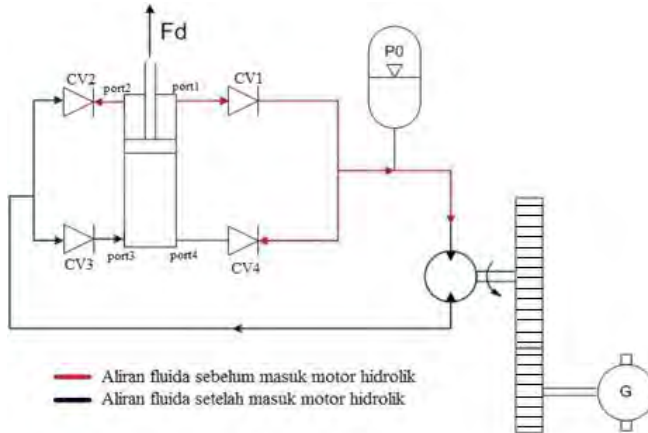
Berikut aliran fluida pada sistem HM RSA saat kondisi kompresi (gambar 3.3) dan kondisi ekspansi (gambar 3.4).



Gambar 3. 3 Aliran fluida saat piston bergerak ke bawah (kompresi)

Pada saat piston bergerak kebawah, maka fluida yang terdapat pada silinder hidrolik keluar melalui port 3 dan port 4 menuju *check valve* CV3 dan CV4. Aliran fluida tertahan pada CV3 karena efek dari *check valve* tersebut, maka aliran fluida mengalir melalui CV4 melewati akumulator lalu masuk ke inlet motor hidrolik. Aliran fluida hanya melewati akumulator dikarenakan akumulator berfungsi sebagai *dampener* dan penyetabil tekanan pada sistem. Pada saat tekanan pada pipa lebih besar dari tekanan awal pada akumulator, maka tekanan tersebut akan disimpan di dalam akumulator. Namun, jika tekanan pada pipa lebih kecil maka akumulator akan memberikan tekanan pada pipa hingga sistem tersebut dalam kondisi stabil. Selanjutnya sebagian fluida mengalir ke CV1 akan tetapi tertahan pada CV1 karena efek *check valve*. Aliran fluida yang masuk ke motor hidrolik menyebabkan motor hidrolik berputar dan putaran tersebut diteruskan ke generator melalui mekanisme pasangan roda gigi. Selanjutnya, aliran fluida keluar melalui outlet motor hidrolik menuju CV2 dan CV3. Aliran fluida tidak dapat mengalir melalui CV3 karena tertahan oleh fluida yang tekanannya lebih besar

yang berasal dari port 3 silinder hidrolik. Sehingga fluida mengalir ke CV2 menuju port 2 silinder hidrolik.

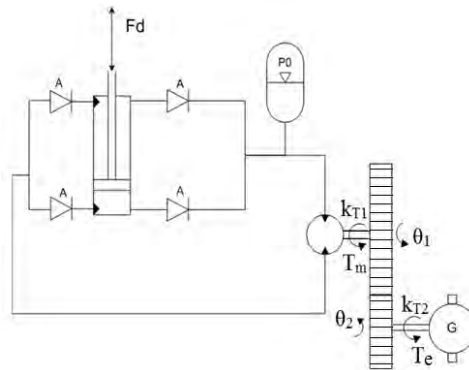


Gambar 3. 4 Aliran fluida saat piston bergerak ke atas (ekspansi)

Pada saat piston bergerak keatas, maka fluida yang terdapat pada silinder hidrolik keluar melalui port 1 dan port 2 menuju *check valve* CV1 dan CV2. Aliran fluida tertahan pada CV2 karena efek dari *check valve* tersebut, maka aliran fluida mengalir melalui CV1 melewati akumulator lalu masuk ke inlet motor hidrolik. Sebagian fluida mengalir ke CV4 akan tetapi tertahan pada CV4 karena efek *check valve*. Aliran fluida yang masuk ke motor hidrolik menyebabkan motor hidrolik berputar dan putaran tersebut diteruskan ke generator melalui mekanisme pasangan roda gigi. Selanjutnya, aliran fluida keluar melalui outlet motor hidrolik menuju CV2 dan CV3. Aliran fluida tidak dapat mengalir melalui CV2 karena tertahan oleh fluida yang tekanannya lebih besar yang berasal dari port 2 silinder hidrolik. Sehingga fluida mengalir ke CV3 menuju port 3 silinder hidrolik.

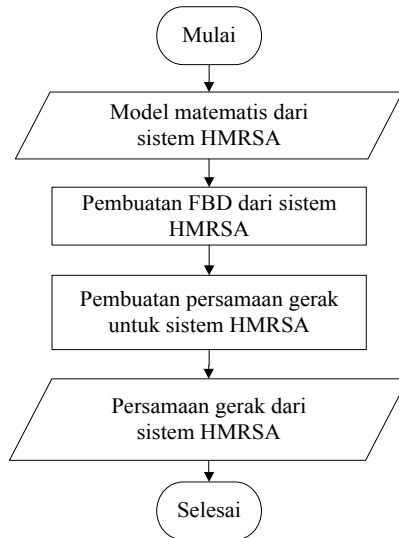
3.2.2 Pemodelan Matematis dan Pembuatan Persamaan dari Sistem HMRSA

Pemodelan matematis untuk sistem HMRSA meliputi motor hidrolik, sepasang *spur gear*, dan generator elektromagnetik.



Gambar 3. 5 Model matematis rancangan sistem HMRSA

Setelah didapatkan model matematis, maka selanjutnya membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. Secara garis besar proses pembuatan persamaan gerak dapat ditransformasikan menjadi diagram alir pada gambar 3.6.



Gambar 3. 6 Diagram alir proses pembuatan persamaan gerak dari sistem HMRSA

3.2.3 Pembuatan Blok Simulasi Sistem HMRSA

Setelah mendapatkan persamaan gerak dari sistem, langkah selanjutnya yaitu membuat blok simulasi. Berikut parameter yang digunakan untuk simulasi sistem HMRSA.

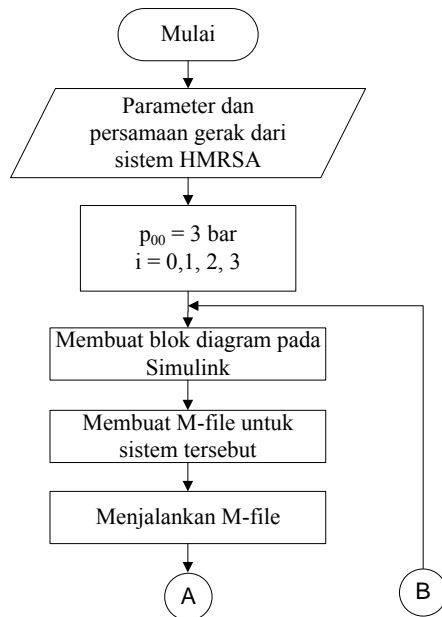
Tabel 3. 1 Parameter untuk sistem HMRSA

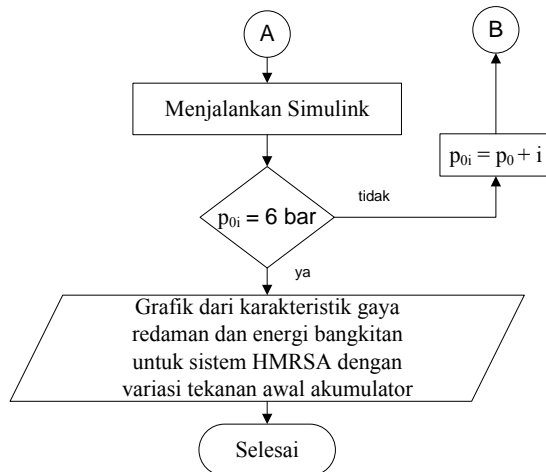
Parameter	Nilai
diameter batang piston (d)	3 cm
diameter silinder hidrolik (D)	5 cm
diameter pipa (d_{tube})	2 mm
massa jenis fluida (ρ)	860 kg/m ³
viskositas kinematik fluida (ν) (ISO VG 10)	10 mm ² /s
efisiensi volumetric (η_v)	0.88

Lanjutan tabel 3.1

Parameter	Nilai
efisiensi mekanik (η_m)	0.9
perpindahan motor hidrolik (q)	8.2 cc/rev
diameter gear 1 (d_{g1})	115 mm
diameter gear 2 (d_{g2})	45 mm
massa gear 1 (m_{g1})	342,9 mg
massa gear 2 (m_{g2})	58,2 mg

Proses pembuatan blok diagram pada Simulink dijelaskan berupa diagram alir pada gambar 3.7. Input yang digunakan yaitu input *sinusoidal* dengan amplitudo 2 cm, frekuensi 2 Hz, variasi tekanan awal akumulator (p_0) 3 – 6 bar.





Gambar 3. 7 Diagram alir proses pembuatan blok diagram Simulink dari sistem HM RSA

3.2.4 Analisis Grafik Sistem HM RSA

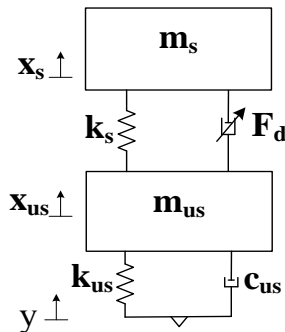
Dari simulasi yang telah dilakukan untuk sistem HM RSA ini, akan didapatkan grafik karakteristik gaya redaman, yaitu berupa grafik gaya redaman terhadap perpindahan maupun kecepatan dengan variasi tekanan awal akumulator sebesar 3 – 6 bar. Selain karakteristik gaya redaman, didapat juga grafik energi bangkitan, berupa grafik daya yang dihasilkan generator terhadap kecepatan, voltase dan arus juga dapat dibandingkan terhadap kecepatan.

Setelah itu grafik-grafik tersebut dianalisis dan diambil kesimpulan. Kemudian dipilih salah satu hasil dalam variasi tekanan awal akumulator tersebut untuk nantinya digunakan sebagai parameter HM RSA pada simulasi seperempat kendaraan.

3.3 Pemodelan dan Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan dengan HMRSA

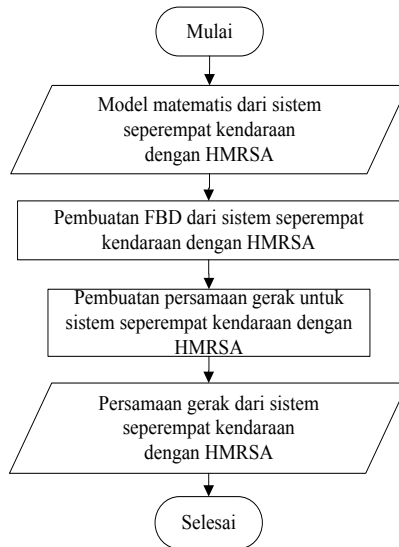
3.3.1 Pemodelan Matematis dan Pembuatan Persamaan dari Sistem HMRSA

Pemodelan matematis yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah pemodelan seperempat kendaraan dengan dua derajat kebebasan (2 DOF) tanpa RSA dan satu derajat kebebasan (1 DOF) untuk pemodelan HMRSA. Pemodelan matematis *quarter car* meliputi 2 DOF yaitu m_{us} (massa roda) dan m_s (massa bodi kendaraan). Pemodelan matematis HMRSA (seperti pada gambar 3.5) meliputi tabung hidrolik beserta akumulator, motor hidrolik, sepasang *spur gear*, dan generator elektromagnetik, dimana sistem tersebut memiliki 1 DOF, yaitu terdiri θ_1 dan θ_2 yang memiliki hubungan pada rasio gear.



Gambar 3. 8 Model matematis sistem seperempat kendaraan dengan F_d merupakan sistem HMRSA

Setelah didapatkan model matematis, maka selanjutnya membuat persamaan gerak dari sistem tersebut. Secara garis besar proses pembuatan persamaan gerak dapat ditransformasikan menjadi diagram alir pada gambar 3.9.



Gambar 3. 9 Diagram alir proses pembuatan persamaan gerak dari sistem HMRSA

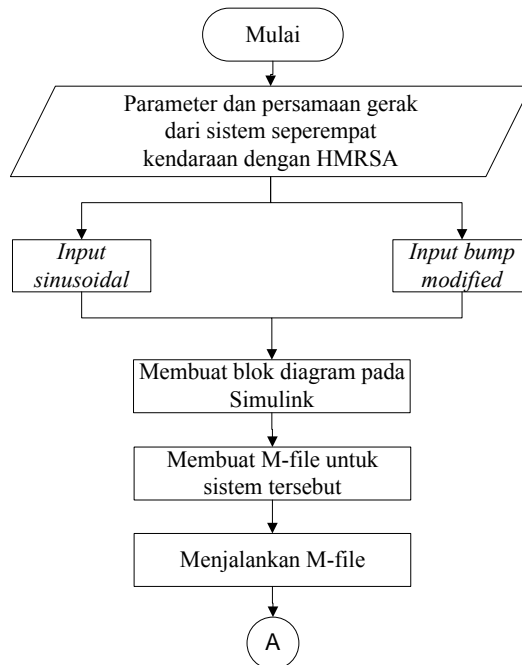
3.3.2 Pembuatan Blok Simulasi Sistem Seperempat Kendaraan dengan HMRSA

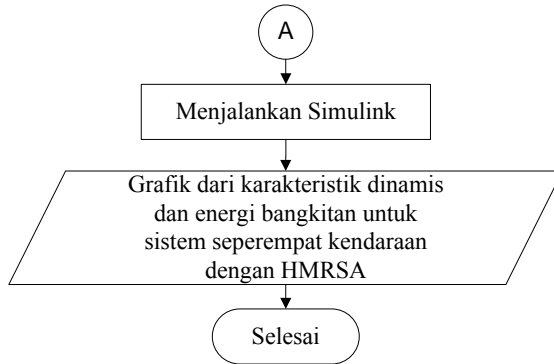
Setelah mendapatkan persamaan gerak dari sistem, langkah selanjutnya yaitu membuat blok simulasi. Parameter yang digunakan untuk seperempat kendaraan, yaitu parameter dari truk (*heavy truck*). Parameter yang digunakan untuk simulasi sistem seperempat kendaraan dengan HMRSA ada pada table 3.2.

Tabel 3. 2 Parameter untuk sistem seperempat kendaraan (*heavy truck*) ^[19]

Parameter	Nilai
<i>sprung mass</i> (m_s)	2250 kg
<i>unsprung mass</i> (m_{us})	200 kg
<i>suspension stiffness</i> (k_s)	180000 N/m
<i>tire stiffness</i> (k_{us})	500000 N/m
<i>unsprung damping coefficient</i> (c_{us})	5000 N.s/m

Proses pembuatan blok diagram pada Simulink dijelaskan berupa diagram alir pada gambar 3.10. Input yang digunakan yaitu input *sinusoidal* dan *bump modified*.





Gambar 3. 10 Diagram alir proses pembuatan blok diagram Simulink dari sistem seperempat kendaraan dengan HMRSA

3.3.3 Analisis Grafik Sistem Seperempat Kendaraan dengan HMRSA

Dari simulasi sistem seperempat kendaraan, akan didapatkan respon dinamis, berupa perpindahan, kecepatan, maupun percepatan dari input *sinudoidal* dan juga *bump modified*. Selain itu, didapatkan juga grafik dari energi bangkitan pada sistem tersebut.

Grafik-grafik tersebut dianalisis. Selain dapat menghasilkan energi listrik, diharapkan HMRSA ini tidak mempengaruhi kenyamanan pada kendaraan. Sehingga dilakukan evaluasi untuk sistem HMRSA pada seperempat kendaraan. Setelah itu mengambil kesimpulan dari hasil analisis dan evaluasi yang telah dilakukan.

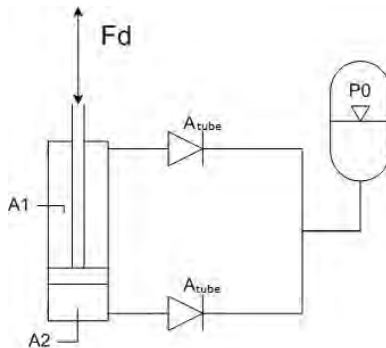
BAB IV

PEMODELAN SISTEM

4.1 Pemodelan Dinamis Sistem HM RSA

Untuk sistem HM RSA ini menggunakan mekanisme hidrolik dengan adanya penambahan akumulator. Kemudian akan dihubungkan dengan motor hidrolik,. Dari motor hidrolik selanjutnya dihubungkan ke pasangan *spur gear*. Setelah itu dari *gear* tersebut dihubungkan ke generator.

4.1.1. Sistem Hidrolik dengan Penambahan Akumulator



Gambar 4. 1 Skema untuk sistem hidrolik dengan penambahan akumulator

Persamaan yang digunakan pada sistem HM RSA (*Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber*) dengan penambahan akumulator sebagai *damper*:

- a. Untuk persamaan silinder hidrolik, menggunakan persamaan Bernoulli (2.7).

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2$$

$h_1 = h_2$, sehingga persamaan menjadi:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2}$$

$$p_2 - p_1 = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2)$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} (v_2^2 - v_1^2) \quad (4.1)$$

dimana 1 : saat kondisi awal dan 2 : saat kondisi akhir

- b. Hubungan silinder hidrolik dengan pipa menggunakan persamaan konservasi massa (2.10):

- Saat kondisi ekspansi

$$Q_1 = Q_{tube}$$

$$v_1 A_1 = v_{tube} A_{tube}$$

$$v_{tube} = \frac{A_1}{A_{tube}} \times v_1 \quad (4.2)$$

Kemudian dilakukan substitusi persamaan (4.2) ke persamaan (4.1) dengan catatan kondisi 2 pada pipa dan kondisi 1 pada silinder hidrolik sehingga persamaan menjadi:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} (v_{tube}^2 - v_1^2)$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_1}{A_{tube}} v_1 \right)^2 - v_1^2 \right)$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} v_1^2 \left(\left(\frac{A_1}{A_{tube}} \right)^2 - 1 \right) \quad (4.3)$$

Persamaan gaya redaman dari persamaan (4.3), yaitu:

$$F_d = \Delta p \times A_1$$

$$F_d = \frac{\rho}{2} A_1 v_1^2 \left(\left(\frac{A_1}{A_{tube}} \right)^2 - 1 \right) \quad (4.4)$$

- Saat kondisi kompresi

$$Q_2 = Q_{tube}$$

$$v_2 A_2 = v_{tube} A_{tube}$$

$$v_{tube} = \frac{A_2}{A_{tube}} \times v_2 \quad (4.5)$$

Kemudian dilakukan substitusi persamaan (4.5) ke persamaan (4.1) dengan catatan kondisi 2 pada pipa dan kondisi 1 pada silinder hidrolik sehingga persamaan menjadi:

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} (v_{tube}^2 - v_2^2)$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} \left(\left(\frac{A_2}{A_{tube}} v_2 \right)^2 - v_2^2 \right)$$

$$\Delta p = \frac{\rho}{2} v_2^2 \left(\left(\frac{A_2}{A_{tube}} \right)^2 - 1 \right) \quad (4.6)$$

Persamaan gaya redaman dari persamaan (4.6), yaitu:

$$F_d = \Delta p \times A_2$$

$$F_d = \frac{\rho}{2} A_2 v_2^2 \left(\left(\frac{A_2}{A_{tube}} \right)^2 - 1 \right) \quad (4.7)$$

dimana:

$$A_1 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)$$

$$A_2 = \frac{\pi D^2}{4}$$

$$A_{tube} = \frac{\pi d_{tube}^2}{4}$$

c. *Head loss* yang terjadi pada sistem hidrolik

$$\frac{\Delta p}{\rho} = h_l$$

$$\Delta p = \rho \cdot h_l \quad (4.8)$$

dimana $h_l = h_{lM} + h_{lm}$

- *Major Head Loss* pada persamaan (2.13):

$$h_{lM} = \frac{32Lv}{d_{tube}^2} \dot{x}$$

- *Minor Head Loss* pada persamaan (2.14) dimana nilai $K = 0.5$ (*square-edge* pada table 2.3)

$$h_{lm} = K \frac{\dot{x}^2}{2}$$

Persamaan gaya redaman dari persamaan (4.8):

- Saat kondisi ekspansi

$$F_d = \Delta p \times A_1$$

$$F_d = (\rho \cdot h_l) A_1$$

$$F_d = \rho \left(\frac{32Lv}{d_{tube}^2} \dot{x} + \frac{K}{2} \dot{x}^2 \right) A_1 \quad (4.9)$$

- Saat kondisi kompresi

$$F_d = \Delta p \times A_2$$

$$F_d = (\rho \cdot h_l) A_2$$

$$F_d = \rho \left(\frac{32Lv}{d_{tube}^2} \dot{x} + \frac{K}{2} \dot{x}^2 \right) A_2 \quad (4.10)$$

- d. Akumulator yang berfungsi sebagai damper, pada persamaan (2.16), yaitu $= p_0$. Sehingga persamaan gaya redaman untuk akumulator, yaitu:

- Saat kondisi ekspansi

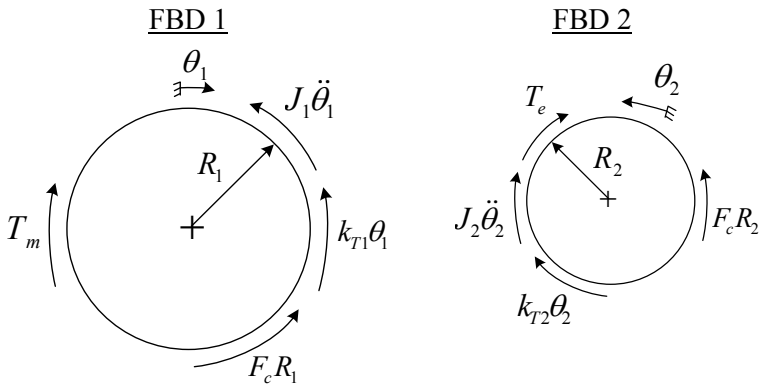
$$F_d = p_0 \times (A_2 - A_1) \quad (4.11)$$

- Saat kondisi kompresi

$$F_d = p_0 \times (A_1 - A_2) \quad (4.12)$$

4.1.2. Motor Hidrolik, Gear, dan Torsi Elektrik pada Generator

Dari model fisik pada gambar 3.5, didapatkan *free body diagram* (FBD) pada gambar 4.2.



Gambar 4. 2 FBD untuk pasangan *spur gear*

Dari gambar 4.2 akan didapatkan persamaan matematis dari FBD 1 dan FBD 2, berikut persamaan untuk FBD 1:

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + k_{T1} \theta_1 + F_t R_1 = T_m$$

karena poros sangat *rigid*, sehingga $k_{T1} \theta_1 \approx 0$

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + F_t R_1 = T_m \quad (4.13)$$

Persamaan untuk FBD 2:

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + k_{T2} \theta_2 + T_e = F_t R_2$$

karena poros sangat rigid, sehingga $k_{T2} \theta_2 \approx 0$

$$J_2 \ddot{\theta}_2 + T_e = F_t R_2$$

$$F_t = \frac{1}{R_2} [J_2 \ddot{\theta}_2 + T_e] \quad (4.14)$$

Kemudian substitusi pers. (4.14) ke (4.13)

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + \frac{R_1}{R_2} [J_2 \ddot{\theta}_2 + T_e] = T_m$$

dengan $N = \frac{R_1}{R_2}$, $\frac{\theta_1}{\theta_2} = \frac{R_2}{R_1}$, dan $\frac{\ddot{\theta}_1}{\ddot{\theta}_2} = \frac{R_2}{R_1}$, maka persamaan tersebut menjadi:

$$J_1 \ddot{\theta}_1 + N [J_2 (N \ddot{\theta}_1) + T_e] = T_m$$

substitusi dengan persamaan T_m yang telah dijelaskan pada persamaan (2.18), sehingga persamaan di atas menjadi:

$$(J_1 + J_2 N^2) \ddot{\theta}_1 + T_e N = \Delta p_m q \eta_m$$

$$\Delta p_m = \frac{1}{q \eta_m} [(J_1 + J_2 N^2) \ddot{\theta}_1 + T_e N] \quad (4.15)$$

dari persamaan (2.17) akan didapatkan:

$$\omega = \frac{Q_m \eta_v}{q}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\eta_v}{q} \frac{dQ_m}{dt}$$

$$\dot{\omega} = \frac{\eta_v}{q} \dot{Q}_m = \frac{\eta_v}{q} A \ddot{x} \quad (4.16)$$

dimana $\ddot{\theta} = \dot{\omega}$, dilakukan substitusi dari persamaan (4.16) ke persamaan (4.15):

$$\Delta p_m = \frac{1}{q\eta_m} \left[\frac{\eta_v}{q} (J_1 + J_2 N^2) \dot{Q}_m + T_e N \right]$$

$$\Delta p_m = \frac{1}{q\eta_m} \left[\frac{\eta_v}{q} A_{\text{relatif}} (J_1 + J_2 N^2) \ddot{x} + T_e N \right] \quad (4.17)$$

dengan catatan A_{relatif} merupakan A saat kondisi ekspansi atau kompresi. Saat kondisi ekspansi, yaitu A_1 , dan untuk kondisi kompresi, yaitu A_2 .

4.1.3. Persamaan generator yang telah dilinierkan (untuk T_e , V , dan I)

Melalui pengujian generator dengan kondisi 50% *state of charge* yang dilakukan oleh Skriptyan, mahasiswa S2 Teknik Mesin ITS, didapatkan didapatkan rumus untuk V , I , dan T_e yang telah dilinierisasi. Dan rumus tersebut yang nantinya digunakan dalam simulasi.

Tabel 4. 1 Hasil pengujian generator untuk SOC 50%

SOC	RPM	V_{L-L}	V_{DC}	$V_{\text{Step Up}}$	I
SOC 50%	36	0.9	0.35	0.15	0
	55	1.2	0.8	0.2	0
	75	1.6	1.37	1.3	0
	105	2.1	2.36	2.12	0
	130	2.3	2.46	12.27	0
	185	3.8	2.8	12.59	0.12
	250	5	3	12.93	0.29
	370	7.2	3.7	13.5	0.57
	630	11.9	7.68	15.3	1.97

Sedangkan untuk torsi elektrik dirumuskan sebagai berikut.

$$T_e = \frac{V.I}{\theta} \quad (4.18)$$

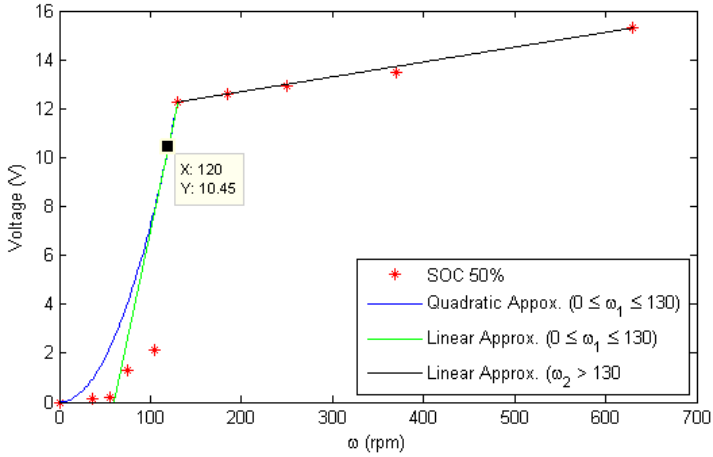
Dengan data yang didapatkan pada Tabel 4.1, dapat digunakan untuk mendapatkan nilai torsi elektrik dengan rumusan pada persamaan (4.18). Tabel 4.2 menunjukkan hasil perhitungan torsi elektrik untuk tiap SOC.

Tabel 4. 2 Torsi elektrik yang dihasilkan untuk SOC 50%

SOC	RPM	T _e
SOC 50%	36	0
	55	0
	75	0
	105	0
	130	0
	185	0.0780
	250	0.1433
	370	0.1987
	630	0.4571

Untuk mendapatkan nilai konstanta pada voltase, arus, dan torsi elektrik diperlukan linierisasi dari data pada Tabel 4.2 dan Tabel 4.3.

a. Voltase (V)



Gambar 4. 3 Grafik voltase pada SOC 50% beserta linierisasi

Grafik voltase yang dihasilkan pada SOC 50% beserta linierisasinya ditunjukkan pada gambar 4.3. Rumus yang didapat setelah linierisasi pada V:

- Pada kondisi 1, $0 \leq \omega_l \leq 130$ rpm

$$V_1 - \bar{V}_1 = \alpha_1(\omega_1 - \bar{\omega}_1)$$

$$V_1 = \alpha_1 \cdot \omega_1 + (-\alpha_1 \cdot \bar{\omega}_1 + \bar{V}_1)$$

$$V_1 = \alpha_1 \cdot \omega_1 + (-\alpha_1 \cdot \bar{\omega}_1 + \bar{V}_1)$$

$$V_1 = \alpha_1 \cdot \omega_1 + A_1 \quad (4. 19)$$

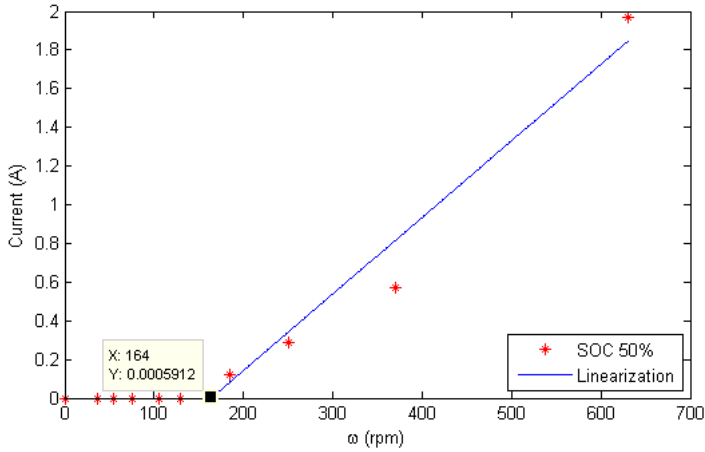
- Pada kondisi 2, $\omega_2 > 130$ rpm

$$V_2 - V_{21} = \alpha_2 \cdot (\omega_2 - \omega_{21})$$

$$V_2 = \alpha_2 \cdot \omega_2 + (-\alpha_2 \cdot \omega_{21} + V_{21})$$

$$V_2 = \alpha_2 \cdot \omega_2 + A_2 \quad (4.20)$$

b. Arus (I)



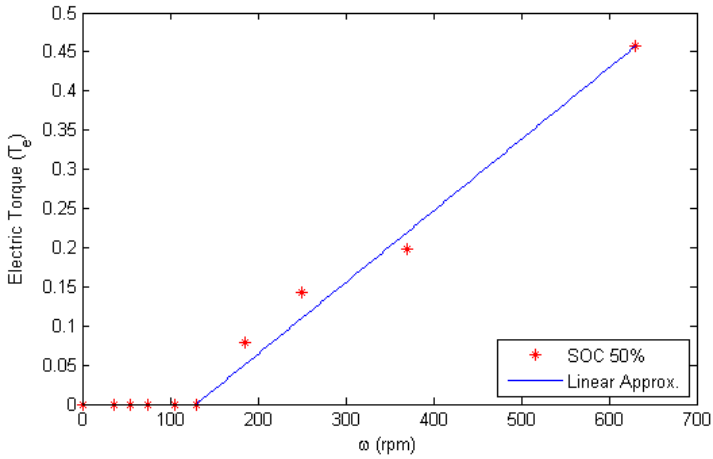
Gambar 4. 4 Grafik arus pada SOC 50% dengan linierisasi

Grafik arus yang dihasilkan pada SOC 50% beserta linierisasinya ditunjukkan pada gambar 4.4. Rumus yang didapat setelah linierisasi arus (I):

$$i - i_1 = \beta \cdot (\omega - \omega_1)$$

$$i = \beta \cdot \omega + (-\beta \cdot \omega_1 + i_1)$$

$$i = \beta \cdot \omega + B \quad (4.21)$$

c. Torsi elektrik (T_e)

Gambar 4. 5 Grafik torsi elektrik pada SOC 50% beserta linierisasi

Grafik torsi elektrik yang dihasilkan pada SOC 50% beserta linierisasinya ditunjukkan pada gambar 4.5. Rumus yang didapat setelah linierisasi T_e :

$$T_e - T_{e1} = C_{Te} \cdot (\omega - \omega_1)$$

$$T_e = C_{Te} \cdot \omega + (-C_{Te} \cdot \omega_1 + T_{e1})$$

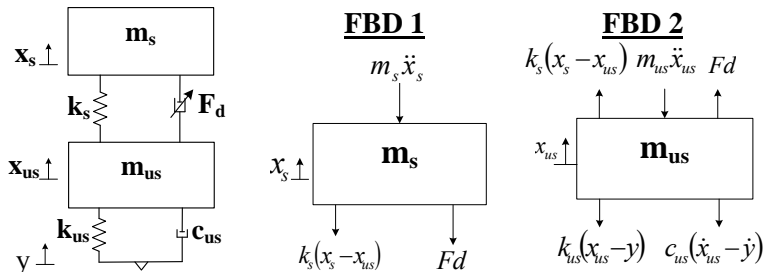
$$T_e = C_{Te} \cdot \omega + \varepsilon \quad (4.22)$$

Tabel 4. 3. Parameter hasil linearisasi untuk simulasi dari uji ekperimen

Voltase	
$0 \leq \omega_l \leq 130 \text{ rpm (kondisi 1)}$	$\omega_2 > 130 \text{ rpm (kondisi 2)}$
$\bar{\omega}_1 = 120 \text{ rpm}$ $\bar{V}_1 = 10,45 \text{ V}$ $\alpha_1 = 0,1742485$ $A_1 = -10,4598$	$\omega_{2l} = 130 \text{ rpm}$ $V_{2l} = 12,27 \text{ V}$ $\alpha_2 = 0,0061$ $A_2 = 11,4822$
Arus	
$\omega > 164 \text{ rpm}$	$0 \leq \omega \leq 164 \text{ rpm}$
$\beta = 0,0039558$ $B = -0.64816$	arus bernilai nol
Torsi Elektrik	
$\omega > 130 \text{ rpm}$	
$Cte = 9,142 \cdot 10^{-4}$ $\varepsilon = -0,11885$	

4.2 Pemodelan Dinamis Seperempat Kendaraan dengan Penambahan HMRSA

Dari model matematis yang telah dijelaskan pada gambar 3.8, akan didapatkan FBD sebagai berikut.



Gambar 4. 6 FBD untuk sistem seperempat kendaraan dan F_d merupakan gaya redaman dari sistem HMRSA

Persamaan matematis dari FBD 1 pada gambar 4.5 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 m_s \ddot{x}_s + F_d + k_s x_s &= 0 \\
 m_s \ddot{x}_s &= -F_d - k_s x_s \\
 \ddot{x}_s &= \frac{1}{m_s} [-F_d - k_s x_s]
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan (4.23), yaitu:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= v \\
 \dot{v}_s &= \frac{1}{m_s} [-F_d - k_s x_s]
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

Persamaan matematis dari FBD 2 pada gambar 4.5 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 m_{us} \ddot{x}_{us} + c_{us} (\dot{x}_{us} - \dot{y}) + k_{us} (x_{us} - y) - F_d - k_s x_s &= 0 \\
 m_{us} \ddot{x}_{us} &= -c_{us} (\dot{x}_{us} - \dot{y}) - k_{us} (x_{us} - y) + F_d + k_s x_s \\
 \ddot{x}_{us} &= \frac{1}{m_{us}} [-c_{us} (\dot{x}_{us} - \dot{y}) - k_{us} (x_{us} - y) + F_d + k_s x_s]
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Persamaan *state variable* dari persamaan (4.25), yaitu:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= v \\
 \dot{y} &= Y \\
 \dot{v}_{us} &= \frac{1}{m_{us}} [-c_{us} (v_{us} - Y) - k_{us} (x_{us} - y) + F_d + k_s x_s]
 \end{aligned} \tag{4.26}$$

4.3 Diagram Blok

Dari persamaan gerak yang didapat, selanjutnya dibuat diagram blok sesuai dengan persamaan gerak dari masing-masing sistem. Dan dari diagram blok tersebut akan didapatkan grafik

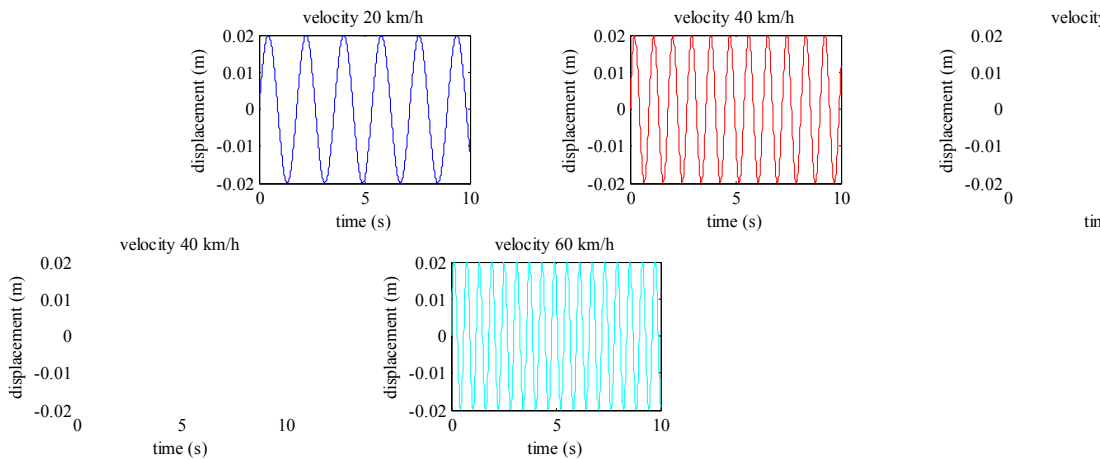
respon dari masing-masing sistem yang akan dibahas pada bab selanjutnya.

4.3.1. Input yang Digunakan

Pada tugas akhir ini, akan dilakukan simulasi untuk sistem HMRSA dan sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA. Pada saat eksekusi simulasi, digunakan dua macam input, yaitu pertama, input sinusoidal yang akan menghasilkan respon *steady-state*. Kedua, input *bump* yang telah dimodifikasi yang akan menghasilkan respon transien. Persamaan dari kedua input tersebut dapat dituliskan sebagai berikut.

- Input sinusoidal

$$y(t) = Y \sin(\omega t)$$



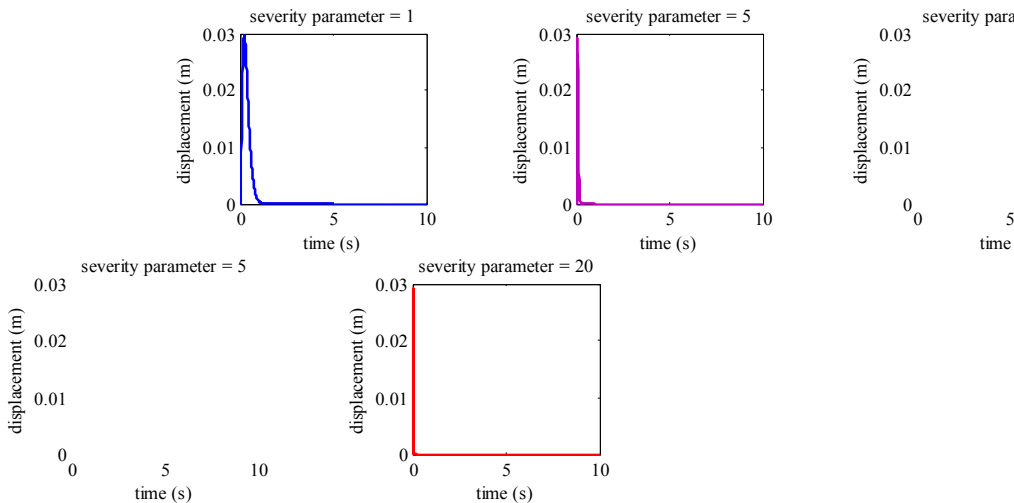
Gambar 4. 7 Profil jalan dengan input sinusoidal

Pada persamaan (4.27), nilai Y merupakan ampiltudo yang digunakan. Amplitudo yang digunakan dalam simulasi, yaitu 2 cm. Besar frekuensi didapatkan dari rumus $f = \frac{v}{\lambda}$, dengan asumsi kecepatan yang digunakan

(v) 40 km/h hingga 60 km/h dan panjang gelombang (λ) 10 m. Setelah itu didapatkan nilai ω , dengan rumus $\omega = 2\pi f$.

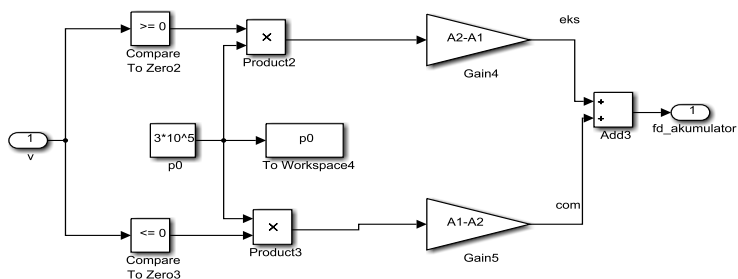
- Input *bump* yang dimodifikasi

$$y(t) = Y 0.37e^2(\gamma\omega_0 t)e^{-\gamma\omega_0 t}$$

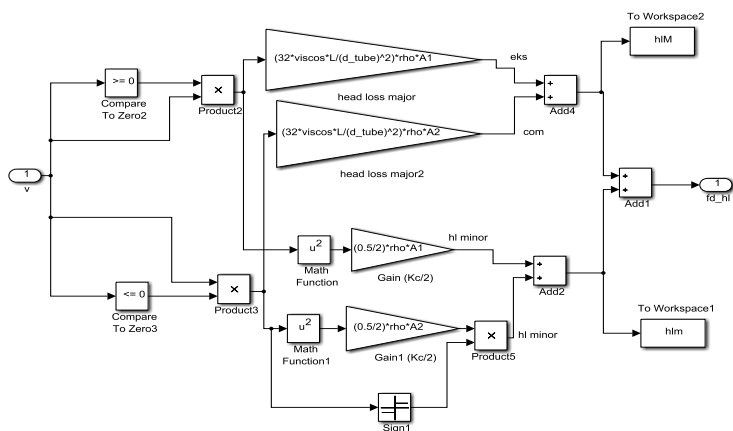
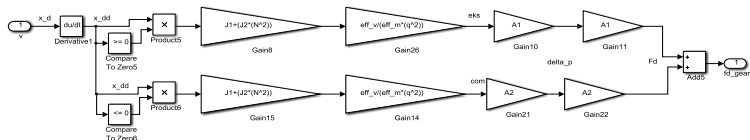


Gambar 4. 8 Profil jalan dengan input *bump* yang dimodifikasi

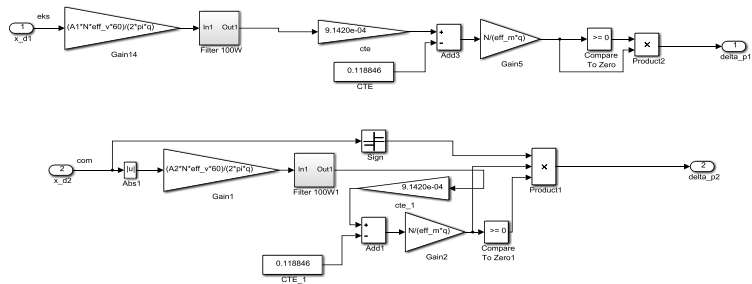
Input ini merupakan fungsi dari γ (*severity parameter*), yaitu 1 untuk *low impact*, 5 untuk *less severe impacts*, dan 20 untuk *more severe impact*. Sedangkan ω_0 adalah $\sqrt{\frac{k_s}{m_s}}$. Nilai Y merupakan ampiltudo yang digunakan. Amplitudo yang digunakan dalam simulasi, yaitu 2 cm.



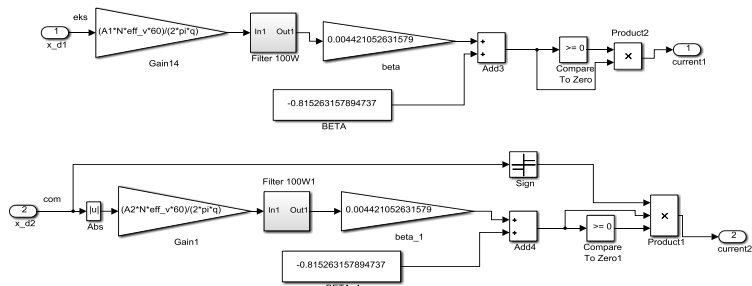
Gambar 4. 11 Diagram blok untuk akumulator

Gambar 4. 12 Diagram blok untuk *major headloss* dan *minor headloss*

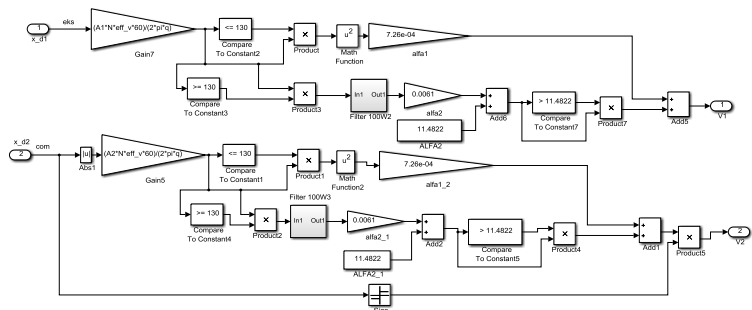
Gambar 4. 13 Diagram blok untuk gear



Gambar 4. 14 Diagram blok untuk torsi elektrik



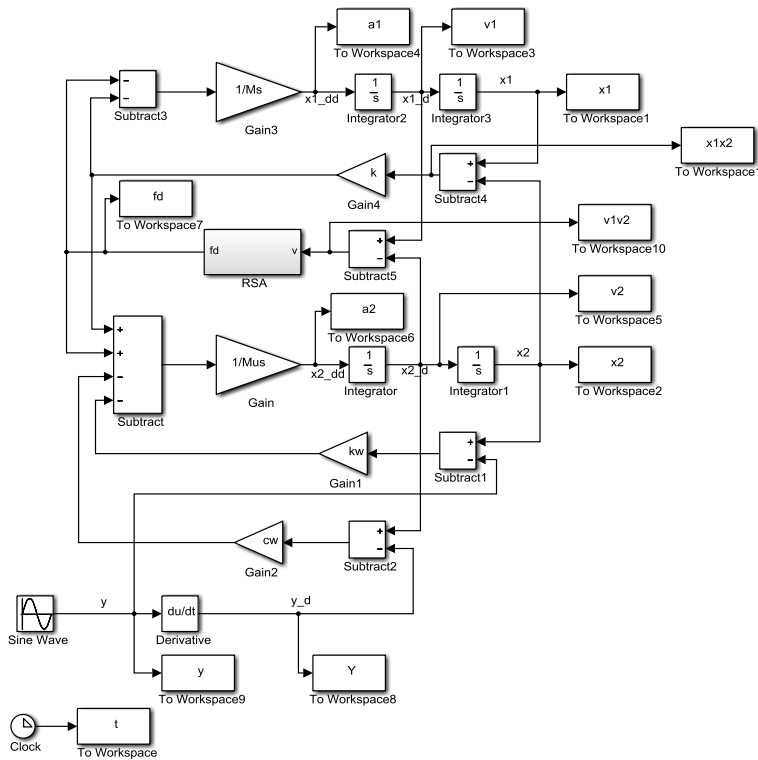
Gambar 4. 15 Diagram blok untuk arus yang dihasilkan HMRSA



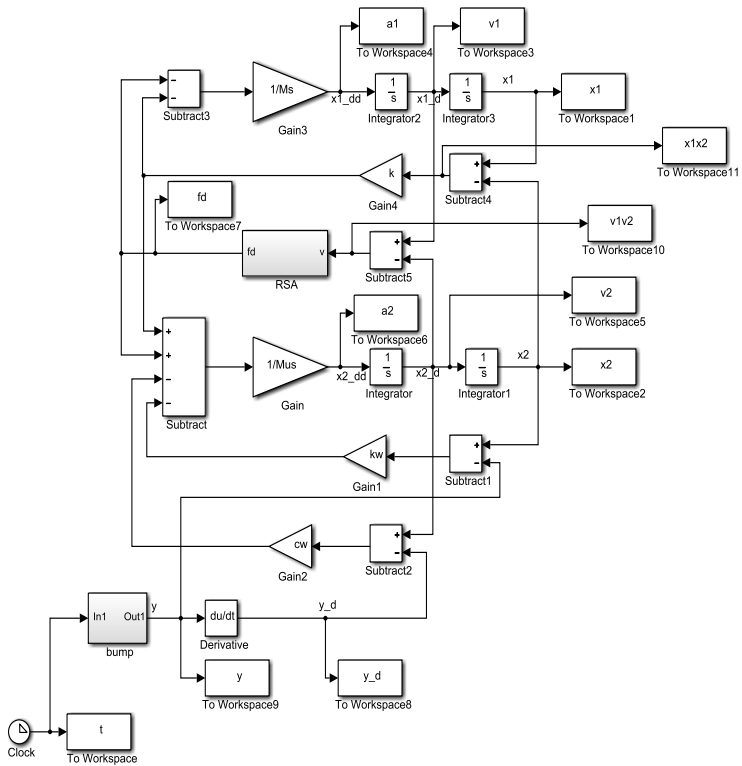
Gambar 4. 16 Diagram untuk voltase yang dihasilkan HMRSA

4.3.3. Diagram Blok Sistem Seperempat Kendaraan dengan Penambahan HMRSA

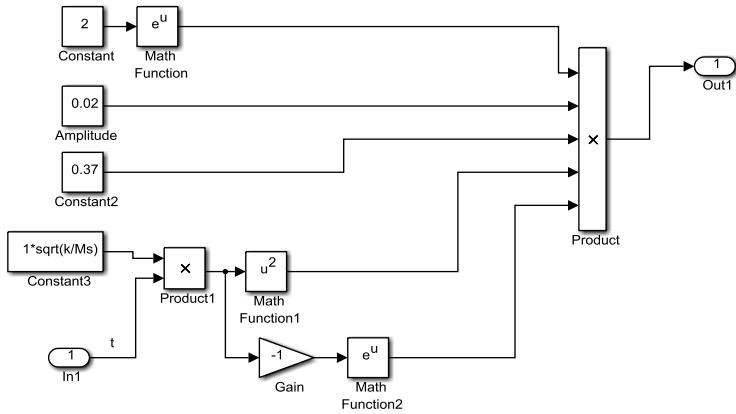
Pada sistem seperempat kendaraan, nilai konstanta redaman pada massa *sprung* digantikan dengan nilai gaya redaman yang dihasilkan sistem HMRSA. Input yang digunakan dalam simulasi sistem seperempat kendaraan, yaitu input sinusoidal dengan variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam dan input *bump* yang telah dimodifikasi dengan γ (*severity parameter*) sama dengan 1 untuk *low impact*. Parameter yang digunakan pada sistem seperempat kendaraan ini telah dijelaskan pada tabel 3.2.



Gambar 4. 17 Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA untuk input *sinusoidal*



Gambar 4. 18 Diagram blok untuk sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA untuk input *bump modified*



Gambar 4. 19 Diagram blok untuk input *bump modified*

BAB V

ANALISA HASIL DAN PEMBAHASAN

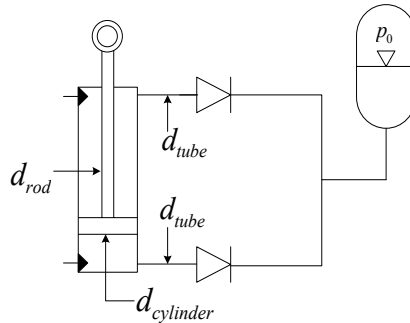
Dalam pemodelan ini didapatkan respon dinamis dari sistem HMRSA dan sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA. Respon dinamis yang dibahas dalam bab ini adalah respon perpindahan, kecepatan, percepatan, dan besar daya listrik bangkitan yang dihasilkan oleh sistem HMRSA. Perlu diketahui bahwa pada grafik respon yang dihasilkan, nilai positif merupakan nilai untuk kondisi ekspansi dan nilai negatif merupakan untuk kondisi kompresi.

Pertama kali yang dilakukan dalam simulasi adalah pemilihan pasangan diameter silinder hidrolik, diameter batang piston, dan diameter pipa yang digunakan. Pilihan pasangan diameter silinder hidrolik dengan diameter batang piston, yaitu 3 cm dengan 1.8 cm dan 5 cm dengan 3 cm. Sedangkan untuk diameter pipa mulai dari 2 mm sampai 5 mm. Setelah itu dipilih pasangan diameter yang digunakan.

Setelah memilih pasangan diameter pada silinder hidrolik, selanjutnya digunakan menjadi parameter untuk sistem HMRSA. Pada simulasi HMRSA, tekanan awal akumulator divariasikan mulai dari 3 bar sampai 6 bar. Kemudian dipilih salah satu tekanan awal akumulator yang nantinya digunakan menjadi parameter pada sistem seperempat kendaraan dengan penambahan HMRSA.

Pada tahap ketiga, sistem HMRSA diaplikasikan pada sistem seperempat kendaraan (truk) dengan input yang digunakan, yaitu input *sinusoidal* dan input *bump modified*. Dari kedua input ini didapatkan respon dinamis dan daya listrik bangkitan yang dihasilkan. Kemudian sistem HMRSA dibandingkan dengan nilai konstanta redaman pada sebuah kendaraan yang sama.

5.1 Respon Dinamis pada Pasangan Diameter Silinder Hidrolik, Diameter Batang Piston, Diameter Pipa dengan Variasi Frekuensi



Gambar 5. 1 Skema dari silinder hidrolik

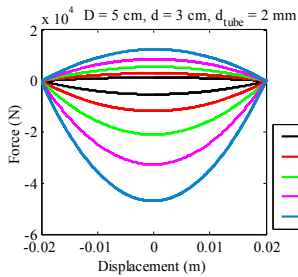
Pada gambar 5.1 dapat dilihat skema dari silinder hidrolik yang divariasikan dengan frekuensi dari perpindahan batang piston. Setelah disimulasikan, dilakukan pemilihan dari pasangan diameter-diameter tersebut mana yang akan digunakan sebagai parameter pada sistem HM RSA. Variasi yang dilakukan dijelaskan pada tabel 5.1.

Tabel 5. 1 Parameter yang digunakan saat simulasi respon dinamis pada pasangan diameter silinder, diameter batang piston, dan diameter batang pipa dengan variasi frekuensi

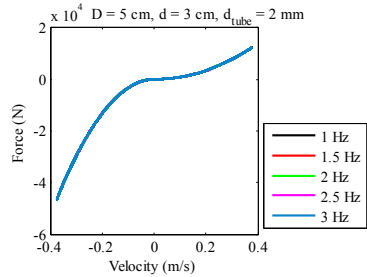
D. Silinder (D) & D. Batang Piston (d)	D. Pipa (d_{tube})	Frekuensi
5 cm & 3 cm	2 mm	1 Hz
	3 mm	1,5 Hz
	4 mm	2 Hz
	2,5 Hz	2,5 Hz
	3 Hz	3 Hz

Lanjutan tabel 5.1

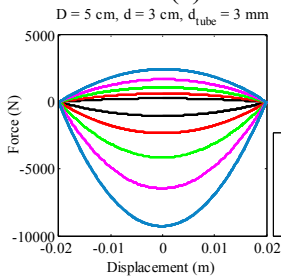
D. Silinder (D) & D. Batang Piston (d)	D. Pipa (d_{tube})	Frekuensi
3 cm & 1,8 cm	2 mm	1 Hz
	3 mm	1,5 Hz
	4 mm	2 Hz
	5 mm	2,5 Hz
		3 Hz



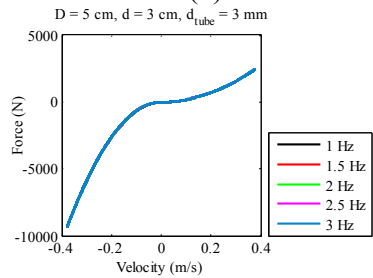
(a)



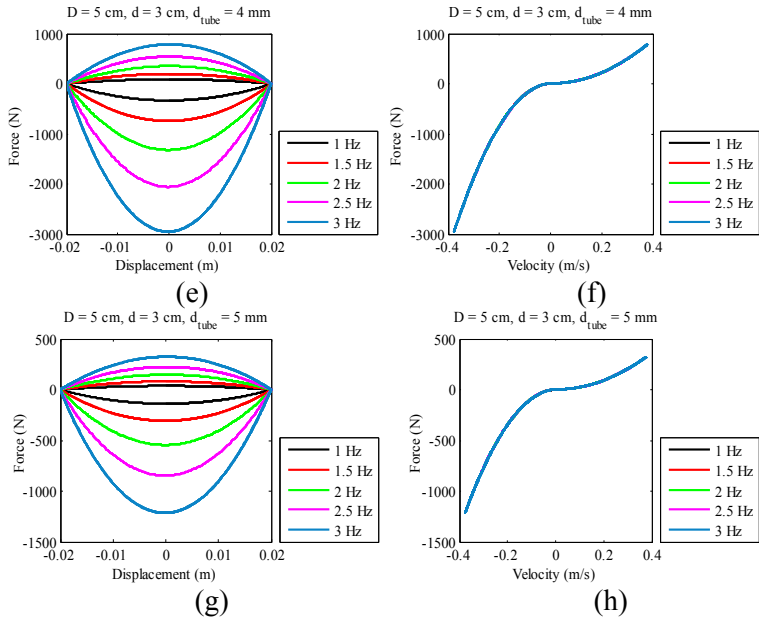
(b)



(c)

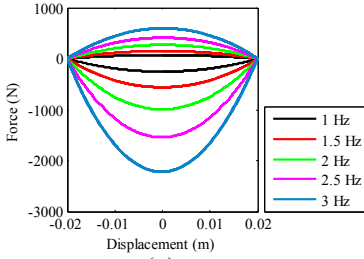


(d)



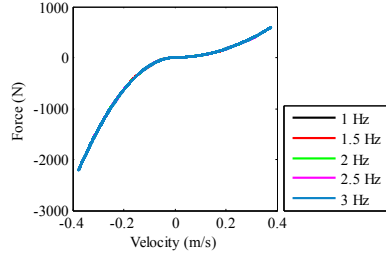
Gambar 5. 2 Grafik respon gaya redam terhadap perpindahan dan kecepatan pada pasangan diameter silinder hidrolik ($D = 5 \text{ cm}$), diameter batang piston ($d = 3 \text{ cm}$), dan diameter pipa ($d_{\text{tube}} = 2\text{-}5 \text{ mm}$) dengan variasi frekuensi

$D = 3 \text{ cm}$, $d = 1.8 \text{ cm}$, $d_{\text{tube}} = 2 \text{ mm}$



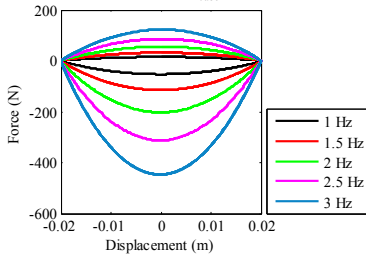
(a)

$D = 3 \text{ cm}$, $d = 1.8 \text{ cm}$, $d_{\text{tube}} = 2 \text{ mm}$



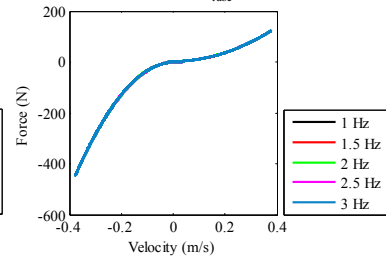
(b)

$D = 3 \text{ cm}$, $d = 1.8 \text{ cm}$, $d_{\text{tube}} = 3 \text{ mm}$



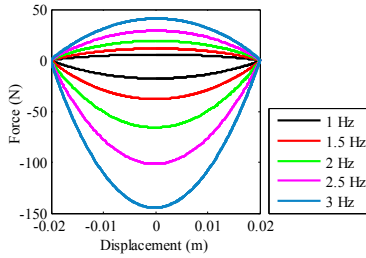
(c)

$D = 3 \text{ cm}$, $d = 1.8 \text{ cm}$, $d_{\text{tube}} = 3 \text{ mm}$



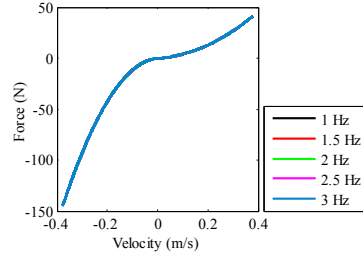
(d)

$D = 3 \text{ cm}$, $d = 1.8 \text{ cm}$, $d_{\text{tube}} = 4 \text{ mm}$

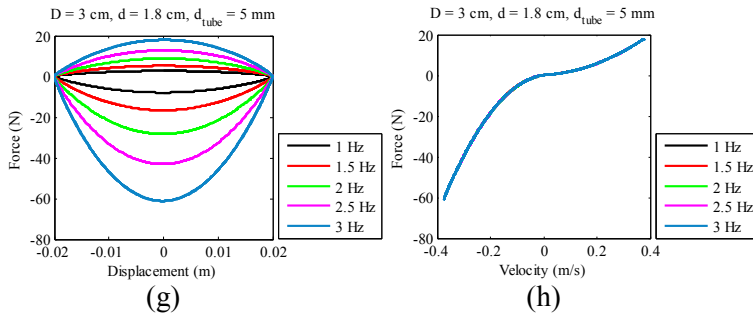


(e)

$D = 3 \text{ cm}$, $d = 1.8 \text{ cm}$, $d_{\text{tube}} = 4 \text{ mm}$



(f)



Gambar 5. 3 Grafik respon gaya redam terhadap perpindahan dan kecepatan pada pasangan diameter silinder hidrolik ($D = 3 \text{ cm}$), diameter batang piston ($d = 1,8 \text{ cm}$), dan diameter pipa ($d_{\text{tube}} = 2\text{-}5 \text{ mm}$) dengan variasi frekuensi

Gambar 5.2 merupakan grafik respon gaya redam terhadap perpindahan (a – c – e – g) dan kecepatan (b – d – f – h) pada pasangan diameter silinder hidrolik ($D = 5 \text{ cm}$), diameter batang piston ($d = 3 \text{ cm}$), dan diameter pipa ($d_{\text{tube}} = 2\text{-}5 \text{ mm}$) dengan variasi frekuensi. Sedangkan untuk gambar 5.3 merupakan grafik respon gaya redam terhadap perpindahan (a – c – e – g) dan kecepatan (b – d – f – h) pada pasangan diameter silinder hidrolik ($D = 3 \text{ cm}$), diameter batang piston ($d = 1,8 \text{ cm}$), dan diameter pipa ($d_{\text{tube}} = 2\text{-}5 \text{ mm}$) dengan variasi frekuensi. Variasi frekuensi yang digunakan yaitu 1 Hz; 1,5 Hz; 2 Hz; 2,5 Hz; 3 Hz.

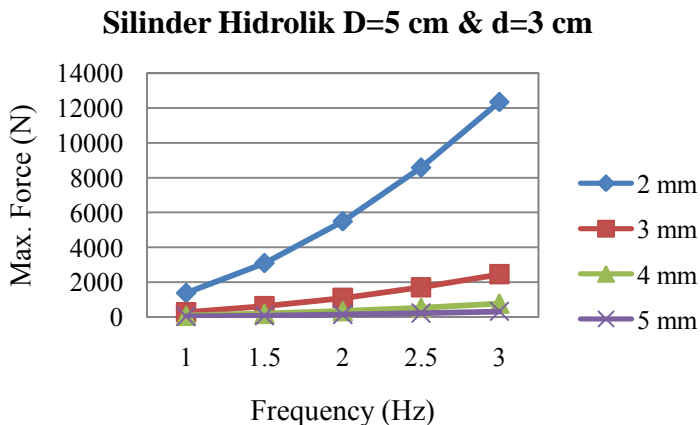
Pada grafik respon gaya redam terhadap perpindahan terlihat jelas bahwa semakin besar frekuensi, maka gaya redam semakin besar. Namun pada grafik respon gaya redam terhadap kecepatan tidak terlihat. Hanya pada frekuensi 3 Hz saja yang terlihat. Hal ini dikarenakan pada frekuensi 1 Hz sampai 2,5 Hz memiliki *trend line* yang sama dengan 3 Hz tetapi hanya berbeda pada nilai gaya redam yang dihasilkan.

Pada tabel 5.2 dan 5.3 merupakan data nilai gaya redam yang dihasilkan sesuai dengan gambar 5.2 dan 5.3. Dari data tersebut, dibuat grafik pengaruh variasi frekuensi terhadap

diameter silinder (D) dan diameter batang piston (d) pada masing-masing diameter pipa (d_{tube}), yaitu pada gambar 5.4 dan 5.5.

Tabel 5. 2 Nilai gaya redam maksimum (kondisi ekspansi) untuk diameter silinder ($D = 5 \text{ cm}$) dan diameter batang piston ($d = 3 \text{ cm}$) pada masing-masing diameter pipa

D. Pipa (d_{tube})	1 Hz	1,5 Hz	2 Hz	2,5 Hz	3 Hz
2 mm	1.384,3 N	3.100,3 N	5.498,8 N	8.579,7 N	12.344 N
3 mm	278,1249 N	619,4455 N	1.095,6 N	1.706,5 N	2.452,4 N
4 mm	90,0771 N	199,1091 N	350,7882 N	545,1199 N	782,1541 N
5 mm	37,9882 N	83,1921 N	145,863 N	226,0031 N	323,633 N

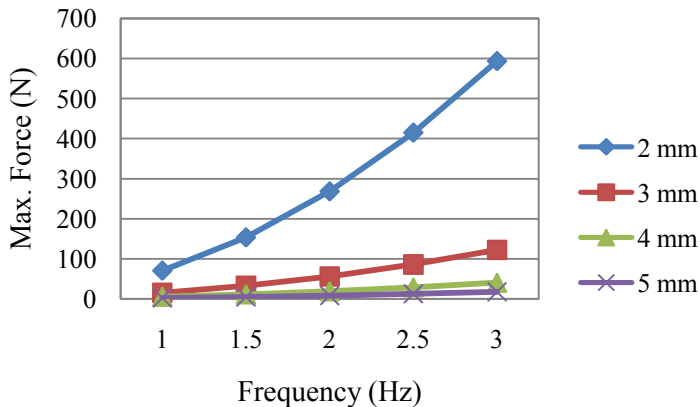


Gambar 5. 4 Grafik pengaruh variasi frekuensi terhadap diameter silinder ($D = 5 \text{ cm}$) dan diameter batang piston ($d = 3 \text{ cm}$) pada masing-masing diameter pipa

Tabel 5. 3 Nilai gaya redam maksimum (kondisi ekspansi) untuk diameter silinder ($D = 3 \text{ cm}$) dan diameter batang piston ($d = 1,8 \text{ cm}$) pada masing-masing diameter pipa

D. Pipa (d_{tube})	1 Hz	1,5 Hz	2 Hz	2,5 Hz	3 Hz
2 mm	70,5402 N	153,5824 N	268,4612 N	415,1807 N	593,7786 N
3 mm	15,6226 N	32,8695 N	56,4044 N	86,2282 N	122,3485 N
4 mm	5,6907 N	11,5207 N	19,3397 N	29,1481 N	40,9482 N
5 mm	2,7242 N	5,3082 N	8,7064 N	12,919 N	17,947 N

Silinder Hidrolik $D=3 \text{ cm}$ & $d=1.8 \text{ cm}$



Gambar 5. 5 Grafik pengaruh variasi frekuensi terhadap diameter silinder ($D = 3 \text{ cm}$) dan diameter batang piston ($d = 1,8 \text{ cm}$) pada masing-masing diameter pipa

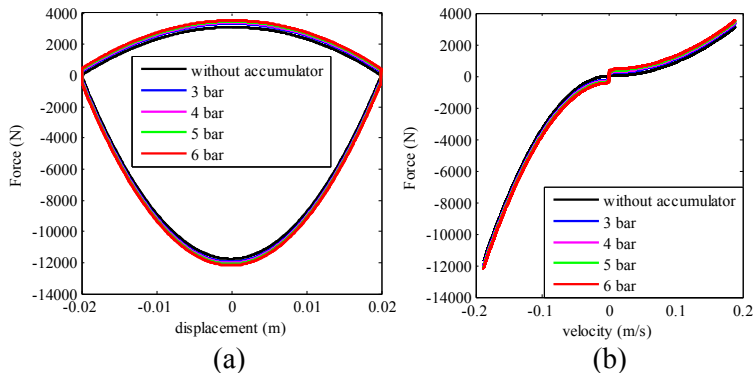
Dari gambar 5.4 dan 5.5, dapat dilihat pada setiap pasangan diameter hidrolik memiliki *trend line* yang sama, yaitu semakin besar frekuensi, maka gaya redam yang dihasilkan semakin besar. Hal ini dikarenakan frekuensi berbanding lurus dengan perpindahan maupun kecepatan, kemudian perpindahan maupun kecepatan juga berbanding lurus dengan gaya redam yang dihasilkan. Pada masing-masing diameter pipa juga dapat dilihat bahwa semakin kecil diameter pipa yang digunakan, maka gaya redam yang dihasilkan semakin besar. Dan jika dibandingkan dari data pada tabel 5.2 dan 5.3, nilai gaya redam yang dihasilkan pada pasangan diameter hidrolik ($D = 5$ cm dan $d = 3$ cm) lebih besar dibandingkan pasangan diameter hidrolik ($D = 3$ cm dan $1,8$ cm). Semakin besar diameter silinder hidrolik dan diameter batang piston, dan semakin kecil diameter pipa, maka gaya redam yang dihasilkan semakin besar. Hal ini sesuai dengan rumus pada silinder hidrolik yang digunakan (persamaan (4.4) dan (4.7)).

Untuk pemilihan pasangan diameter yang digunakan, yaitu dipilih pasangan diameter yang dapat menghasilkan gaya redam yang paling besar, yaitu diameter silinder 5 cm, diameter batang piston 3 cm, dan diameter pipa 2 mm pada grafik 5.2 (a) dan (b).

5.2 Respon Dinamis Sistem HM RSA

Pada sistem HM RSA ini menggunakan penambahan akumulator setelah sistem hidrolik. Dimana pada penambahan akumulator ini dapat menambah gaya redam yang dihasilkan.

5.2.1. Perbandingan Respon Gaya Redam pada Sistem Hidrolik dengan dan Tanpa Akumulator



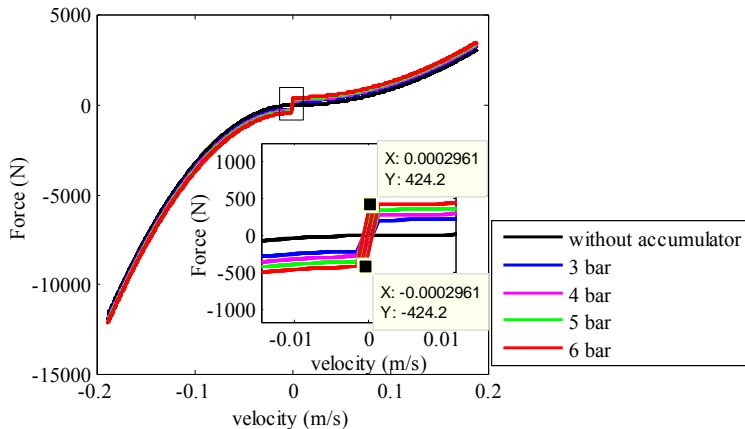
Gambar 5. 6 Grafik perbandingan gaya redam terhadap (a) perpindahan dan (b) kecepatan pada sistem hidrolik dengan dan tanpa akumulator

Tabel 5. 4 Nilai gaya redam yang dihasilkan pada sistem hidrolik dengan dan tanpa akumulator

Kondisi	Tanpa akumulator	Dengan akumulator			
		3 bar	4 bar	5 bar	6 bar
Ekspansi (max)	3.100,3 N	3.312,4 N	3.383,1 N	3.453,8 N	3.524,4 N
Kompresi (min)	-11.763 N	-11.975 N	-12.045 N	-12.116 N	-12.187 N

Dari tabel 5.4 dapat dilihat nilai gaya redam yang dihasilkan. Jika dibandingkan, sistem hidrolik tanpa menggunakan akumulator menghasilkan gaya redam yang paling kecil dan yang paling besar menghasilkan gaya redam, yaitu sistem hidrolik dengan akumulator pada tekanan awal 6 bar. Dapat disimpulkan bahwa dengan adanya akumulator, gaya

redam yang dihasilkan oleh sistem hidrolik lebih besar. Dan semakin besar tekanan awal pada akumulator, maka gaya redam yang dihasilkan juga lebih besar seperti yang telah ditunjukkan pada gambar 5.7 (b).

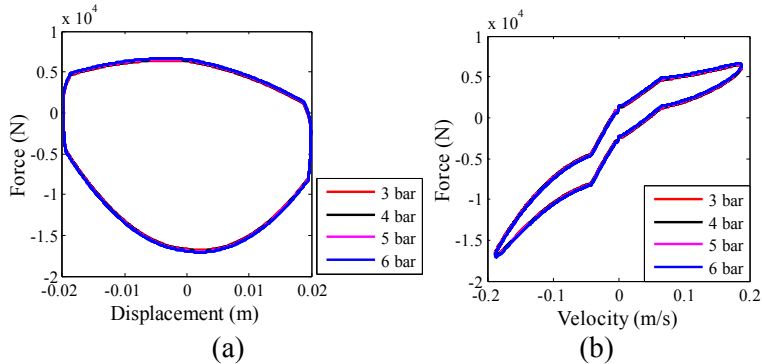


Gambar 5. 7 (a) Grafik perbandingan gaya redam terhadap kecepatan pada sistem hidrolik dengan dan tanpa akumulator, dan (b) merupakan grafik perbesaran dari grafik (a)

Pada gambar 5.7 (a) merupakan grafik yang sama dengan grafik 5.6 (b), yaitu grafik perbandingan gaya redam terhadap kecepatan pada sistem hidrolik dengan dan tanpa akumulator. Sedangkan gambar 5.7 (b) merupakan perbesaran dari gambar 5.5 (a). Dari gambar 5.5 (b) dapat dilihat dengan jelas pengaruh dari penambahan akumulator. Salah satu contoh pada tekanan awal akumulator sebesar 6 bar, pada saat kondisi ekspansi, nilai gaya redam meningkat dari 0 hingga 424.2 N dan begitu juga saat kondisi kompresi. Adanya kenaikan nilai gaya redam pada waktu yang sama disebabkan karena pada saat kecepatan dari piston sama dengan nol, nilai tekanan pada sistem sama dengan tekanan awal pada akumulator. Sehingga pada saat kecepatan dari piston

sama dengan nol, sistem menghasilkan gaya redam sebesar gaya redam pada akumulator.

5.2.2. Respon Gaya Redam, Voltase, Arus, dan Daya Listrik Bangkitan dengan Variasi Tekanan Awal Akumulator



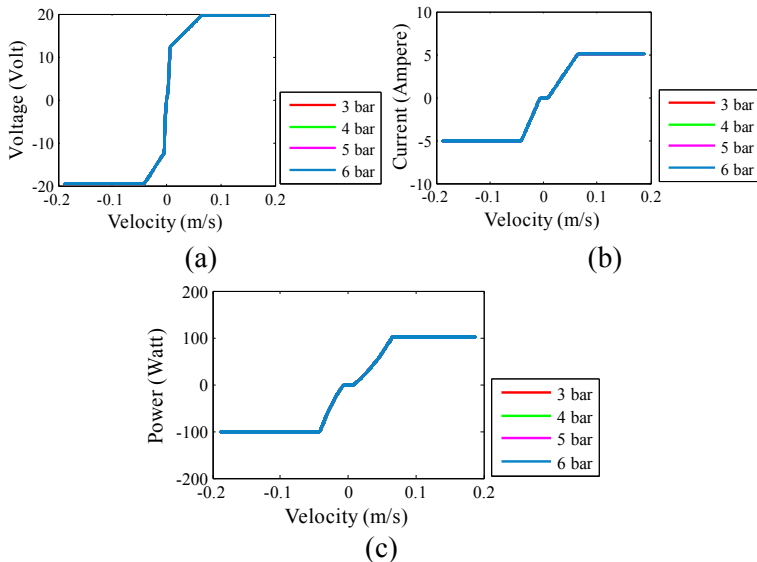
Gambar 5. 8 Grafik respon gaya redam terhadap (a) perpindahan dan (b) kecepatan pada sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal akumulator (p_0)

Gambar 5.8 merupakan grafik respon gaya redam terhadap perpindahan dan kecepatan pada sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal akumulator mulai dari 3 bar sampai 6 bar. Berikut data gaya redam yang dihasilkan dari gambar 5.8 dijelaskan pada tabel 5.5.

Tabel 5. 5 Nilai gaya redam yang dihasilkan dari sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal akumulator

Kondisi	3 bar	4 bar	5 bar	6 bar
Ekspansi (max)	6.427 N	6.497 N	6.568 N	6.639 N
Kompresi (min)	-16.850 N	-16.920 N	-16.990 N	-17.060 N

Dari data nilai gaya redam pada tabel 5.5 dan gambar 5.8 dapat dilihat bahwa semakin besar tekanan awal akumulator, maka akan semakin besar gaya redam yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan rumus akumulator yang digunakan, yaitu tekanan awal akumulator berbanding lurus dengan gaya redam yang dihasilkan.



Gambar 5. 9 Grafik respon (a) voltase, (b) arus, dan (c) daya listrik bangkitan terhadap kecepatan pada sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal akumulator

Gambar 5.9 merupakan grafik respon voltase, arus, dan daya listrik bangkitan terhadap kecepatan pada sistem HMRSA dengan variasi tekanan awal akumulator mulai dari 3 bar hingga 6 bar. Nilai voltase, arus, dan daya listrik bangkitan maksimum yang dihasilkan pada saat 3 bar hingga 6 bar mempunyai nilai yang sama. Voltase maksimum yang dihasilkan sebesar 19,64 volt saat 0,1885 m/s. Untuk arus maksimum yang dihasilkan sebesar 5,096 ampere saat 0,1885 m/s. Dan untuk daya listrik

bangkitan maksimum yang dihasilkan sebesar 100 watt saat 0,1885 m/s.

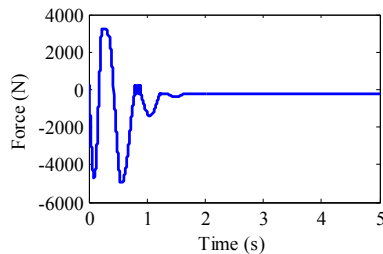
Dari ketiga gambar tersebut juga dapat dilihat bahwa voltase, arus, dan daya listrik bangkitan memiliki *trend line* yang sama saat tekanan awal akumulator 3 bar hingga 6 bar. Hal ini dikarenakan tekanan awal akumulator tidak mempengaruhi besarnya nilai voltase, arus, dan daya listrik bangkitan yang dihasilkan. Hal ini juga sesuai dengan rumus yang digunakan. Yang mempengaruhi besarnya nilai-nilai tersebut bukanlah nilai tekanan awal akumulator, melainkan diameter silinder dan diameter batang piston.

Pada simulasi HM RSA ini, menggunakan generator dengan spesifikasi daya yang dihasilkan maksimum sebesar 100 Watt. Sehingga pada gambar 5.9 voltase, arus, dan daya listrik bangkitan bernilai konstan pada nilai maksimum masing-masing. Untuk voltase nilai maksimum sebesar 20 volt, untuk arus nilai maksimum sebesar 5 ampere, dan pada daya listrik bangkitan nilai maksimum sebesar 100 watt. Untuk mencapai nilai-nilai maksimum tersebut hanya membutuhkan kecepatan kurang dari 0.1 m/s.

5.3 Respon Dinamis Sistem Seperempat Kendaraan dengan Penambahan Sistem HM RSA

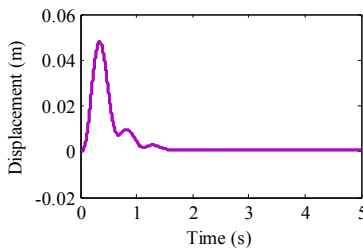
Setelah dilakukan simulasi pada sistem HM RSA, sistem HM RSA tersebut diaplikasikan pada sistem seperempat kendaraan (truk) dengan input yang digunakan, yaitu input *sinusoidal* dan input *bump modified*. Untuk sistem HM RSA tersebut digunakan spesifikasi pada akumulator, yaitu tekanan awal akumulator yang digunakan sebesar 3 bar.

5.3.1. Input Bump

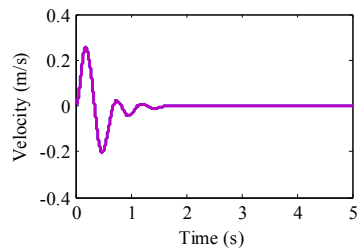


Gambar 5. 10 Grafik respon gaya redam terhadap waktu dengan input *bump modified*

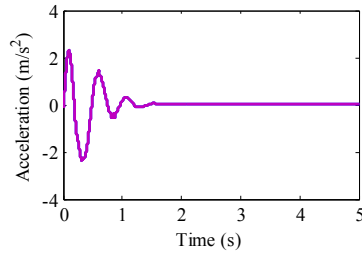
Gambar 5.10 merupakan grafik respon gaya redam terhadap waktu dengan input *bump modified*. Dapat dilihat dari grafik tersebut, respon yang terjadi merupakan respon *transient*. Respon gaya redam tersebut mencapai kondisi *steady state* kurang dari 2 detik. Nilai maksimum gaya redam pada saat ekspansi sebesar 3.236,3 N dan pada saat kompresi sebesar 4.929,3 N.



(a)



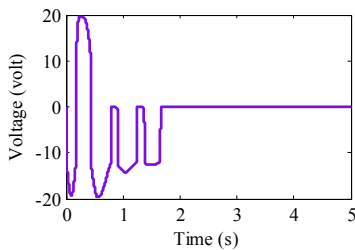
(b)



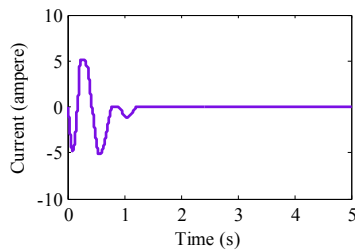
(c)

Gambar 5. 11 Grafik respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, (c) percepatan pada massa *sprung* terhadap waktu dengan input *bump modified*

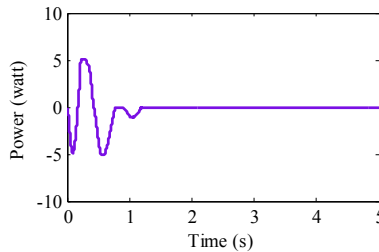
Gambar 5.11 merupakan grafik respon dinamis berupa perpindahan (a), kecepatan, dan percepatan pada massa *sprung* terhadap waktu dengan input *bump modified*. Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik. Pada grafik respon perpindahan 5.13 (a), nilai maksimum perpindahan sangat kecil, yaitu sebesar 0,048 m. Pada grafik respon kecepatan 5.13 (b) nilai maksimum kecepatan sebesar 0,2573 m/s. Pada grafik respon percepatan 5.13 (c) nilai maksimum percepatan sebesar 2,3628 m/s^2 .



(a)



(b)

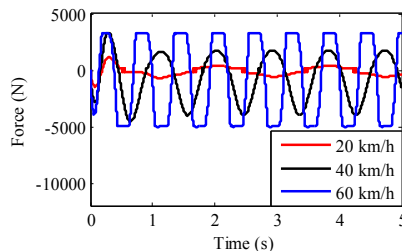


(c)

Gambar 5. 12 Grafik respon (a) voltase, (b) arus, dan (c) daya listrik bangkitan terhadap waktu dengan input *bump modified*

Gambar 5.12 merupakan grafik respon (a) voltase, (b) arus, dan (c) daya listrik bangkitan yang dihasilkan sistem HM RSA terhadap waktu dengan input *bump modified*. Dari ketiga grafik tersebut respon *transient* yang didapat hampir sama, yaitu mencapai kondisi *steady state* sebelum 2 detik. Pada grafik voltase 5.14 (a), nilai maksimum sebesar 19,6 V. Pada grafik arus 5.14 (b), nilai maksimum sebesar 5,1 A. Pada grafik daya listrik bangkitan 5.14 (c), daya yang dihasilkan dapat mencapai nilai maksimum sebesar 100 W.

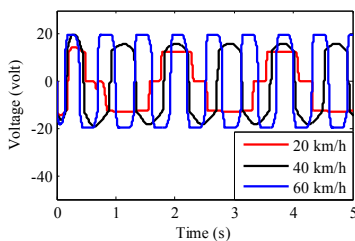
5.3.2. Input Sinusoidal



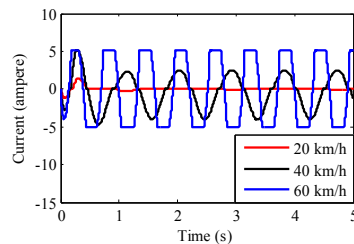
Gambar 5. 13 Grafik respon gaya redam terhadap waktu dengan variasi kecepatan

Gambar 5.13 merupakan grafik respon gaya redam terhadap waktu dengan variasi kecepatan 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam. Variasi kecepatan tersebut digunakan untuk mewakili kendaraan saat melaju di jalan raya. Namun kecepatan tersebut diasumsikan konstan. *Trend line* dari ketiga grafik tersebut sangatlah berbeda. Dikarenakan nilai frekuensi didapatkan dengan menggunakan rumus $f = \frac{v}{\lambda}$. Sehingga semakin besar kecepatan, dengan λ yang konstan, maka didapatkan nilai frekuensi yang semakin besar. Semakin besar frekuensi, maka gelombang yang dihasilkan tiap detik akan semakin banyak. Dan hal tersebut dapat dilihat pada gambar 5.13, pada kecepatan 60 km/jam memiliki gelombang yang paling banyak dibanding grafik lainnya.

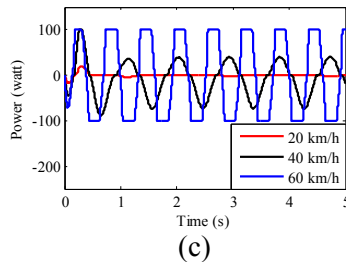
Dari gambar 5.13 dapat dilihat bahwa respon dari grafik tersebut merupakan respon *steady state*. Pada kecepatan 20 km/jam dan 40 km/jam, respon gaya redam mencapai *steady state* setelah 3 detik. Untuk kecepatan 20 km/jam nilai gaya redam maksimum saat ekspansi sebesar 1.760 N dan saat kompresi sebesar 3.985 N. Untuk kecepatan 40 km/jam nilai gaya redam maksimum saat ekspansi sebesar 384 N dan saat kompresi sebesar 576 N. Namun pada kecepatan 60 km/jam, respon gaya redam mencapai *steady state* setelah 2 detik dengan nilai gaya redam maksimum saat ekspansi sebesar 3.253 N dan saat kompresi sebesar 5.012 N.



(a)



(b)



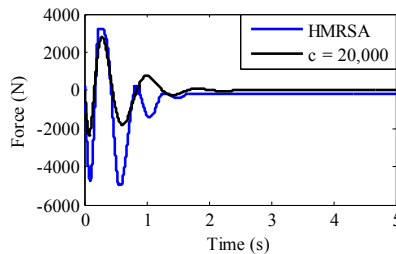
Gambar 5. 14 Grafik respon (a) voltase, (b) arus, dan (c) daya listrik bangkitan terhadap waktu dengan variasi kecepatan

Gambar 5.14 merupakan grafik respon dari voltase, arus, dan daya listrik bangkitan yang dihasilkan oleh sistem HMRSA terhadap waktu. Variasi kecepatan yang digunakan dalam grafik ini sama dengan yang sebelumnya, yaitu 20 km/jam, 40 km/jam, dan 60 km/jam. *Trend line* dari ketiga gambar tersebut sangatlah berbeda. Dikarenakan nilai frekuensi didapatkan dengan menggunakan rumus $f = \frac{v}{\lambda}$. Sehingga semakin besar kecepatan, dengan λ yang konstan, maka didapatkan nilai frekuensi yang semakin besar. Nilai frekuensi berbanding lurus dengan nilai kecepatan. Generator yang digunakan dalam sistem HMRSA ini hanya dapat menghasilkan daya maksimum sebesar 100 watt. Pada grafik respon daya listrik bangkitan terhadap waktu dapat dilihat bahwa pada saat kecepatan 20 km/jam, tidak ada daya listrik bangkitan yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan pada saat kecepatan tersebut, tidak ada arus yang dihasilkan. Pada saat kecepatan tersebut, putaran pada generator sangat kecil. Telah dijelaskan pada tabel 4.3, bahwa saat putaran generator antara 0 hingga 164 rpm, tidak ada arus yang dihasilkan. Sedangkan pada saat kecepatan 60 km/jam, daya listrik bangkitan dapat mencapai daya maksimum sebesar 100 watt.

5.4 Perbandingan Sistem HMRSA dengan Koefisien Redaman Pada Model Seperempat Kendaraan

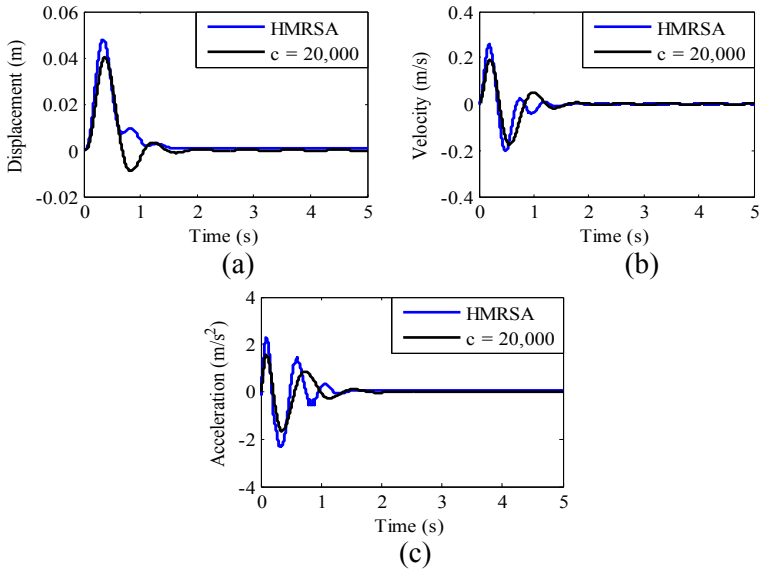
Sering kali nilai koefisien redaman pada sebuah kendaraan dinyatakan dengan konstanta. Namun, pada kenyataannya setelah dilakukan pengujian pada sebuah *shock absorber*, nilai koefisien redaman tersebut tidaklah sebuah konstanta. Sehingga perlu dibandingkan agar mengetahui perbedaan saat model seperempat kendaraan menggunakan HMRSA dengan hanya menggunakan koefisien redaman.

5.4.1. Input Bump



Gambar 5. 15 Grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada input *bump modified*

Gambar 5.15 merupakan grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) dan masing-masing di aplikasikan pada model seperempat kendaraan dengan input *bump modified*. Dari grafik tersebut dapat dilihat bentuk karakteristik gaya redam. Jika dibandingkan, *trend line* grafik dari keduanya berbeda. Tetapi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai respon *transient* hampir sama, yaitu kurang dari 2 detik. Pada saat kondisi kompresi, gaya redam yang dihasilkan sistem HMRSA jauh lebih besar dibandingkan dengan grafik sistem peredam konvensional.

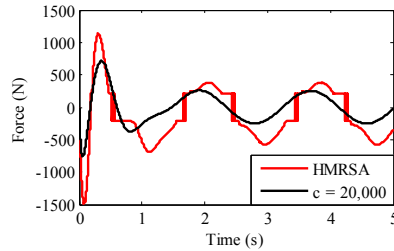


Gambar 5. 16 Grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa *sprung* terhadap waktu antara sistem HM RSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) pada input *bump modified*

Gambar 5.16 merupakan grafik perbandingan respon respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa *sprung* terhadap waktu antara sistem HM RSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) dan masing-masing di aplikasikan pada model seperempat kendaraan dengan input *bump modified*. Dari grafik tersebut dapat dilihat bentuk karakteristik dinamis dari massa *sprung*. Jika dibandingkan, *trend line* grafik dari keduanya hampir sama tetapi tidak ada yang berhimpit. Tetapi waktu yang dibutuhkan untuk mencapai respon *transient* hampir sama, yaitu kurang dari 2 detik. Respon perpindahan, kecepatan, dan percepatan yang dihasilkan sistem HM RSA lebih besar dibandingkan dengan grafik sistem peredam konvensional.

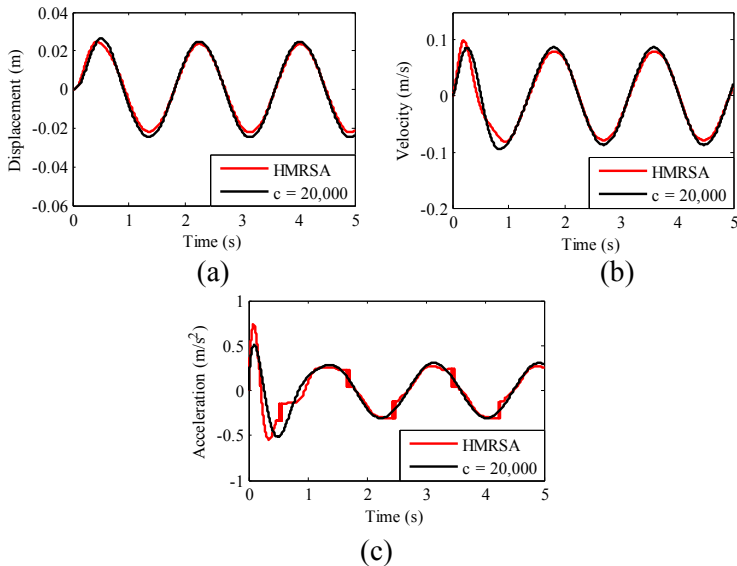
5.4.2. Input Sinusoidal

- Pada kecepatan 20 km/jam



Gambar 5. 17 Grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) pada kecepatan 20 km/jam

Gambar 5.17 merupakan grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) dan masing-masing di aplikasikan pada model seperempat kendaraan dengan kecepatan kendaraan sebesar 20 km/jam (asumsi kecepatan konstan) dengan λ 10 m. Dari grafik tersebut dapat dilihat bentuk karakteristik gaya redam. Jika dibandingkan, *trend line* grafik dari keduanya sangat berbeda. Hal ini disebabkan karena adanya penambahan akumulator pada sistem HMRSA. Adanya kenaikan nilai gaya redam pada waktu yang sama disebabkan karena pada saat kecepatan sama dengan nol, nilai tekanan pada sistem sama dengan tekanan awal pada akumulator. Sehingga pada saat kecepatan nol, sistem menghasilkan gaya redam sebesar gaya redam pada akumulator.

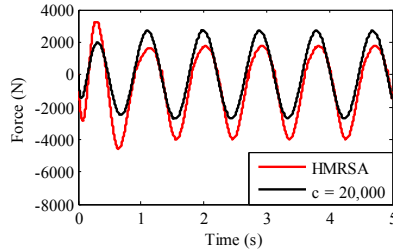


Gambar 5. 18 Grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa *sprung* terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) pada kecepatan 20 km/jam

Gambar 5.18 merupakan grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa *sprung* terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) pada kecepatan 20 km/jam. Dapat dilihat untuk *trend line* grafik respon perpindahan dan kecepatan hampir berhimpit dengan grafik sistem peredam konvensional. Nilai RMS untuk perpindahan pada sistem HMRSA sebesar 0,0162 m dan pada sistem peredam konvensional sebesar 0,0175 m. Dan nilai RMS untuk kecepatan pada sistem HMRSA sebesar 0,0571 m/s dan pada sistem peredam konvensional sebesar 0,0618 m/s. Pada grafik percepatan, grafik HMRSA berhimpit dengan grafik sistem peredam konvensional tetapi *trend line* grafik tersebut jelas berbeda. Dan nilai RMS untuk percepatan pada sistem HMRSA

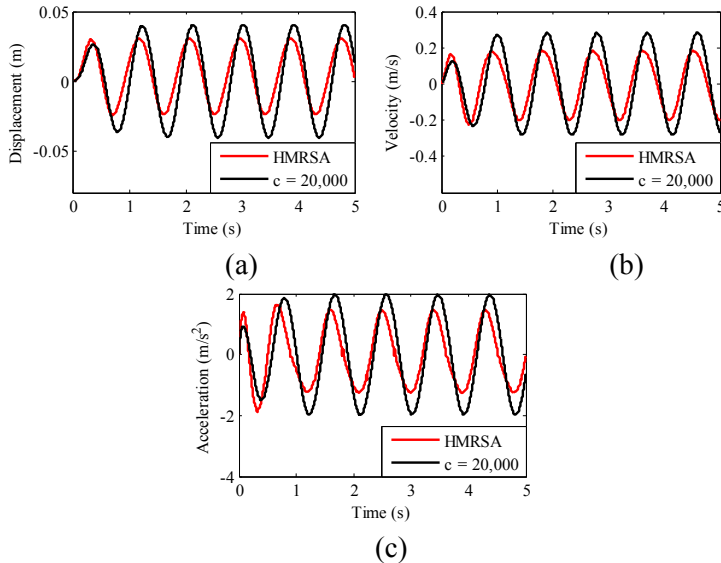
sebesar $0,2427 \text{ m/s}^2$ dan pada sistem peredam konvensional sebesar $0,2457 \text{ m/s}^2$.

- Pada saat kecepatan 40 km/jam



Gambar 5. 19 Grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada kecepatan 40 km/jam

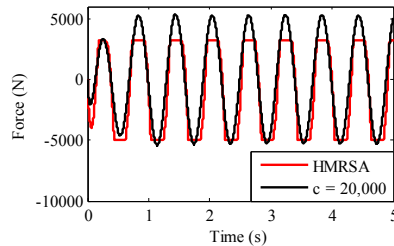
Gambar 5.19 merupakan grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) dan masing-masing di aplikasikan pada model seperempat kendaraan dengan kecepatan kendaraan sebesar 40 km/jam (asumsi kecepatan konstan) dengan λ 10 m. Dari grafik tersebut dapat dilihat bentuk karakteristik gaya redam. Jika dibandingkan, *trend line* grafik dari keduanya hampir sama. Nilai gaya redam maksimum pada sistem HMRSA saat mencapai *steady state* sebesar 1.760 N (ekspansi) dan 3.986 N (kompresi). Sedangkan pada sistem peredam konvensional nilai gaya redam maksimum yang dihasilkan sebesar 2.710 N (ekspansi dan kompresi).



Gambar 5. 20 Grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa *sprung* terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) pada kecepatan 40 km/jam

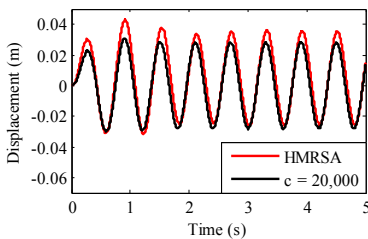
Gambar 5.20 merupakan grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa *sprung* terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) pada kecepatan 40 km/jam. Dapat dilihat untuk *trend line* ketiga grafik tersebut sama tetapi tidak berhimpit dengan grafik sistem peredam konvensional. Nilai RMS untuk perpindahan pada sistem HMRSA sebesar 0,0197 m dan pada sistem peredam konvensional sebesar 0,0273 m. Nilai RMS untuk kecepatan pada sistem HMRSA sebesar 0,1345 m/s dan pada sistem peredam konvensional sebesar 0,1888 m/s. Nilai RMS untuk percepatan pada sistem HMRSA sebesar 0,9821 m/s² dan pada sistem peredam konvensional sebesar 1,3463 m/s².

- Pada saat kecepatan 60 km/jam

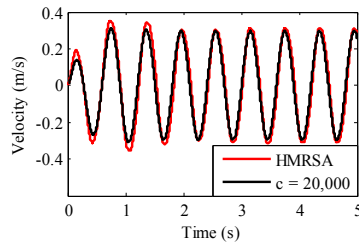


Gambar 5. 21 Grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) pada kecepatan 60 km/jam

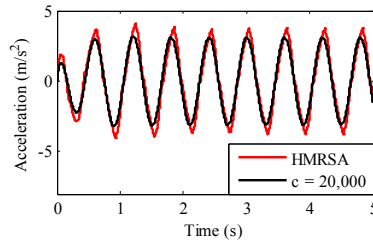
Gambar 5.21 merupakan grafik perbandingan respon gaya redam terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) dan masing-masing di aplikasikan pada model seperempat kendaraan dengan kecepatan kendaraan sebesar 60 km/jam (asumsi kecepatan konstan) dengan λ 10 m. Dari grafik tersebut dapat dilihat bentuk karakteristik gaya redam. Jika dibandingkan, *trend line* grafik dari keduanya berbeda. Nilai gaya redam maksimum pada sistem HMRSA saat mencapai *steady state* sebesar 3.242 N ketika ekspansi dan 4.960 N ketika kompresi. Dan pada sistem peredam konvensional, nilai gaya redam maksimum yang dihasilkan sebesar 5.294 N saat ekspansi maupun kompresi.



(a)



(b)



(c)

Gambar 5. 22 Grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa *sprung* terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada kecepatan 60 km/jam

Gambar 5.22 merupakan grafik perbandingan respon (a) perpindahan, (b) kecepatan, dan (c) percepatan pada massa *sprung* terhadap waktu antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada kecepatan 60 km/jam . Dapat dilihat untuk *trend line* ketiga grafik tersebut sama tetapi tidak berhimpit dengan grafik sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$). Nilai RMS untuk perpindahan pada sistem HMRSA sebesar $0,0224 \text{ m}$ dan pada sistem peredam konvensional sebesar $0,0197 \text{ m}$. Nilai RMS untuk kecepatan pada sistem HMRSA sebesar $0,2276 \text{ m/s}$ dan pada sistem peredam konvensional sebesar $0,2053 \text{ m/s}$. Nilai RMS untuk percepatan pada sistem HMRSA sebesar $2,3658 \text{ m/s}^2$ dan pada sistem peredam konvensional sebesar $2,1266 \text{ m/s}^2$.

Tabel 5. 6 Nilai RMS untuk respon gaya redam yang dihasilkan dengan variasi kecepatan

RMS	20 km/h		40 km/h	
	HMRSA	Konvensional	HMRSA	Konvensional
Gaya Redam (N)	453,4821	250,6051	2.198,3	1.842,5
	60 km/h			
	HMRSA		Konvensional	
	3.702,6		3.614,6	

Tabel 5. 7 Nilai RMS untuk respon dinamis dengan variasi kecepatan

RMS Perpindahan (m)	20 km/h		40 km/h	
	HMRSA	Konvensional	HMRSA	Konvensional
	0,0162	0,0175	0,0197	0,0273
	60 km/h			
	HMRSA		Konvensional	
	0,0224		0,0197	
RMS Kecepatan (m/s)	20 km/h		40 km/h	
	HMRSA	Konvensional	HMRSA	Konvensional
	0,0571	0,0618	0,1345	0,1888
	60 km/h			
	HMRSA		Konvensional	
	0,2276		0,2053	
RMS Percepatan (m/s^2)	20 km/h		40 km/h	
	HMRSA	Konvensional	HMRSA	Konvensional
	0,2427	0,2457	0,9821	1,3463
	60 km/h			
	HMRSA		Konvensional	
	2,3658		2,1266	

5.4.3. *Displacement Transmibillity* dan Respon Percepatan RMS

Tabel 5. 8 Parameter untuk perpindahan dan percepatan (RMS) menggunakan sistem HMRSA

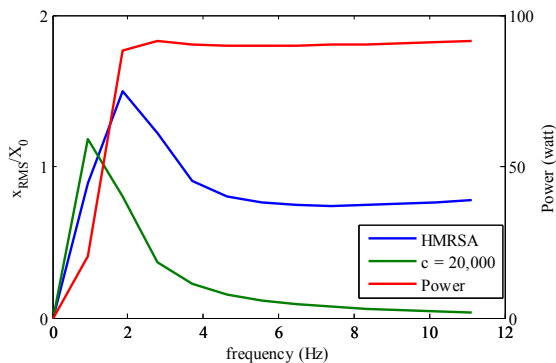
Kecepatan (km/jam)	Frequency (Hz)	x_{RMS}/x_0	a_{RMS} (m/s^2)	P_{RMS} (Watt)
0	0	0	0	0
10	0,9259	0,8895	0,6431	20,4325
20	1,8519	1,4998	3,5395	88,5075
30	2,7778	1,2249	4,2563	91,3763
40	3,7037	0,9025	3,6322	90,4333
50	4,6296	0,8013	3,3759	90,0125
60	5,5556	0,7613	3,2707	89,9405
70	6,4815	0,7443	3,2284	90,0599
80	7,4074	0,7421	3,2235	90,2077
90	8,3333	0,7454	3,2493	90,5126
100	9,2593	0,7535	3,2928	90,8797
110	10,1852	0,7652	3,3406	91,1372
120	11,1111	0,7787	3,3989	91,4679

Tabel 5. 9 Parameter untuk perpindahan dan percepatan (RMS) menggunakan $c = 20.000 \text{ N-s/m}$

Kecepatan (km/jam)	Frequency (Hz)	x_{RMS}/x_0	a_{RMS} (m/s^2)
0	0	0	0
10	0,9259	1,1827	0,8281
20	1,8519	0,8051	2,1297
30	2,7778	0,3670	2,1479
40	3,7037	0,2243	2,3033
50	4,6296	0,1558	2,4679
60	5,5556	0,1157	2,6040
70	6,4815	0,0898	2,7054

Lanjutan tabel 5.9

Kecepatan (km/jam)	Frequency (Hz)	x_{RMS}/x_0	a_{RMS} (m/s ²)
80	7,4074	0,0720	2,7839
90	8,3333	0,0593	2,8501
100	9,2593	0,0499	2,9029
110	10,1852	0,0427	2,9403
120	11,1111	0,0371	2,9694



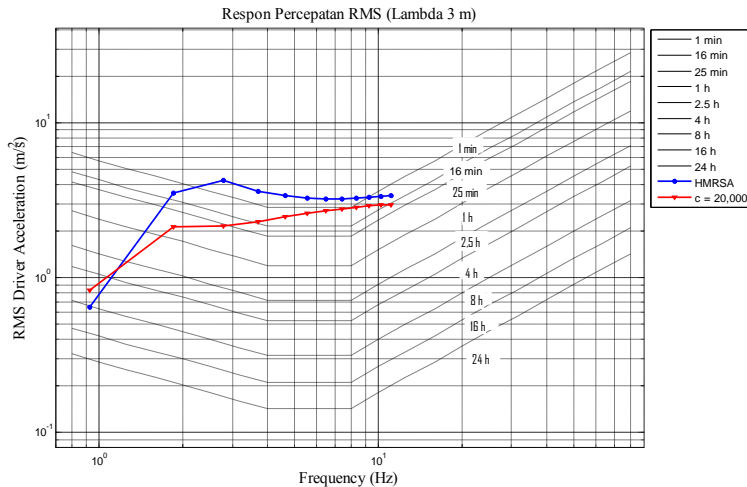
Gambar 5. 23 Grafik *displacement transmissibility* dan daya listrik bangkitan yang dihasilkan

Gambar 5.23 merupakan grafik *displacement transmissibility* dengan variasi kecepatan dari 0 sampai 120 km/jam dari sistem HMRSA dan sistem peredam konvensional dengan koefisien redaman ($c = 20.000$ N-s/m) dan grafik daya listrik bangkitan yang dihasilkan dengan variasi frekuensi. Dapat dilihat bahwa pada titik tertinggi dari grafik sistem HMRSA pada x_{RMS}/x_0 sebesar 1,4998 saat frekuensi sebesar 1,8519 Hz dengan amplitudo jalan yang digunakan sebesar 2 cm (0,02 m) dan panjang gelombang 3 m. Sedangkan untuk grafik sistem peredam konvensional nilai pada titik tertinggi sebesar 1,1827 saat

frekuensi 0,9259 Hz dengan amplitudo jalan yang digunakan sebesar 2 cm (0,02 m) dan panjang gelombang 3 m.

<u>HMRSA</u>	<u>Konvensional</u>
$\frac{x_{RMS}}{X_0} = 1,4498$	$\frac{x_{RMS}}{X_0} = 1,1827$
$x_{RMS} = 1,4498X_0$	$x_{RMS} = 1,1827X_0$
$x_{RMS} = 1,4498(0,02)$	$x_{RMS} = 1,1827(0,02)$
$x_{RMS} = 0,028996 \text{ m}$	$x_{RMS} = 0,023654 \text{ m}$

Hal ini menunjukkan bahwa amplitudo 2 cm untuk input jalan sinusoidal dapat mentransmisikan perpindahan sebesar 2,89 cm ke massa kendaraan pada sistem HMRSA dan pada sistem konvensional, dapat mentransmisikan perpindahan sebesar 2,37 cm ke massa kendaraan. Jika dibandingkan antara sistem HMRSA dengan sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$), sistem HMRSA menghasilkan *displacement transmissibility* yang lebih besar dibandingkan dengan sistem peredam konvensional. Namun, sistem HMRSA dapat menghasilkan listrik yang terus meningkat dari kecepatan 10 km/jam hingga 120 km/jam. Dan sistem HMRSA ini dapat menghasilkan listrik terbesar saat kecepatan 120 km/jam sekitar 91,4679 Watt (sesuai tabel 5.8).



Gambar 5. 24 Grafik respon percepatan RMS terhadap frekuensi dengan asumsi lambda sebesar 3 meter

Gambar 5.24 merupakan grafik respon percepatan RMS (*Root Mean Square*) terhadap frekuensi dengan asumsi lambda 3 meter dari sistem HM RSA dan sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m). Pada grafik tersebut menggunakan variasi kecepatan mulai dari 0, 10, 20, hingga 100 km/jam. Dari kecepatan tersebut, akan didapatkan nilai frekuensi dengan menggunakan rumus $f = \frac{v}{\lambda}$. Kemudian nilai percepatan RMS dengan frekuensi tersebut di plot pada grafik RMS ISO 2631.

Pada gambar 5.24 merupakan grafik ketahanan pengemudi saat berkendara berdasarkan ISO 2631. Dapat dilihat untuk sistem HM RSA pada kecepatan 10 km/jam pengemudi dapat bertahan hingga 8 jam. Pada kecepatan 20, 100, 110, dan 120 km/jam pengemudi dapat bertahan hanya sekitar 1 menit saja. Sedangkan untuk kecepatan 30 km/jam hingga 90 km/jam pengemudi bertahan kurang dari 1 menit. Sedangkan untuk sistem peredam konvensional ($c = 20.000$ N-s/m) pada kecepatan 10 km/jam pengemudi dapat bertahan hingga 4 jam. Pada

kecepatan 20 dan 30 km/jam, pengendara bertahan sekitar 25 menit. Sedangkan untuk kecepatan 40 sampai 110 km/jam, pengendara dapat bertahan hanya sekitar 1 menit saja. Dan pada kecepatan 120 km/jam, pengendara mampu bertahan sekitar 16 menit. Namun pada realitanya, kendaraan saat melintas di jalan, kecepatannya bervariasi. Sehingga frekuensinya juga bervariasi. Grafik tersebut hanya melihat pada saat kecepatan tertentu saja.

BAB VI

PENUTUP

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis pada sistem HM RSA dan sistem seperempat kendaraan dengan penambahan sistem HM RSA, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Semakin besar frekuensi, maka gaya redaman yang dihasilkan akan semakin besar. Hal ini dikarenakan frekuensi berbanding lurus dengan perpindahan maupun kecepatan, kemudian perpindahan maupun kecepatan juga berbanding lurus dengan gaya redaman yang dihasilkan.
2. Gaya redaman yang dihasilkan oleh HM RSA lebih besar dibandingkan HM RSA tanpa akumulator. Pada saat ekspansi, gaya redaman yang dihasilkan dari HM RSA dengan akumulator sebesar 4656 N dan yang dihasilkan HM RSA tanpa akumulator sebesar 4444 N. Sedangkan pada saat kompresi, gaya redaman yang dihasilkan HM RSA dengan akumulator sebesar 10.230 N dan yang dihasilkan HM RSA tanpa akumulator sebesar 10.020 N.
3. Semakin besar tekanan awal akumulator, maka akan semakin besar gaya redaman yang dihasilkan. Hal ini sesuai dengan rumus akumulator yang digunakan, yaitu tekanan awal akumulator berbanding lurus dengan gaya redaman yang dihasilkan.
4. Tekanan awal akumulator tidak mempengaruhi besarnya nilai voltase, arus, dan daya listrik bangkitan yang dihasilkan. Yang mempengaruhi besarnya nilai-nilai tersebut bukanlah nilai tekanan awal akumulator, melainkan diameter silinder dan diameter batang piston.
5. Pada sistem seperempat kendaraan dengan penambahan sistem HM RSA untuk input sinusoidal, respon dari grafik gaya redaman terhadap waktu dengan variasi kecepatan, pada kecepatan 20 km/jam dan 40 km/jam, respon gaya

redaman mencapai *steady state* setelah 3 detik. Untuk kecepatan 20 km/jam nilai gaya redaman maksimum saat ekspansi sebesar 1.760 N dan saat kompresi sebesar 3.985 N. Untuk kecepatan 40 km/jam nilai gaya redaman maksimum saat ekspansi sebesar 384 N dan saat kompresi sebesar 576 N. Namun pada kecepatan 60 km/jam, respon gaya redaman mencapai *steady state* setelah 2 detik dengan nilai gaya redaman maksimum saat ekspansi sebesar 3.253 N dan saat kompresi sebesar 5.012 N. Sedangkan untuk grafik respon daya listrik bangkitan yang dihasilkan oleh sistem HMRSA terhadap waktu, pada saat kecepatan 20 km/jam, tidak ada daya listrik bangkitan yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan pada saat kecepatan tersebut, tidak ada arus yang dihasilkan. Dan pada saat kecepatan 60 km/jam, daya listrik bangkitan dapat mencapai daya maksimum sebesar 100 watt.

6. Pada sistem seperempat kendaraan dengan penambahan sistem HMRSA untuk input *bump modified*, untuk seluruh respon merupakan respon *transient* dan mencapai kondisi *steady state* kurang dari 2 detik.
7. Pada titik tertinggi dari grafik sistem HMRSA pada x_{RMS}/x_0 sebesar 1,4998 saat frekuensi sebesar 1,8519 Hz dengan amplitudo jalan yang digunakan sebesar 2 cm (0,02 m) dan panjang gelombang 3 m. Sedangkan untuk grafik sistem peredam konvensional nilai pada titik tertinggi sebesar 1,1827 saat frekuensi 0,9259 Hz dengan amplitudo jalan yang digunakan sebesar 2 cm (0,02 m) dan panjang gelombang 3 m.
8. Berdasarkan grafik ISO-2631, untuk sistem HMRSA pada kecepatan 10 km/jam pengendara dapat bertahan hingga 8 jam. Pada kecepatan 20, 100, 110, dan 120 km/jam pengendara dapat bertahan hanya sekitar 1 menit saja. Sedangkan untuk kecepatan 30 km/jam hingga 90 km/jam pengendara bertahan kurang dari 1 menit. Sedangkan untuk sistem peredam konvensional ($c = 20.000 \text{ N-s/m}$) pada kecepatan 10 km/jam pengendara dapat bertahan hingga 4

jam. Pada kecepatan 20 dan 30 km/jam, pengendara bertahan sekitar 25 menit. Sedangkan untuk kecepatan 40 sampai 110 km/jam, pengendara dapat bertahan hanya sekitar 1 menit saja. Dan pada kecepatan 120 km/jam, pengendara mampu bertahan sekitar 16 menit.

6.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mencoba pasangan diameter silinder dan batang piston selain 5 cm dengan 3 cm.
2. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk menggunakan mekanisme *gear* yang berbeda.
3. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk mengaplikasikan HM RSA ini pada model setengah kendaraan (*half car*).
4. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk menggunakan generator yang memiliki spesifikasi daya *output* lebih besar sehingga diharapkan dapat menghasilkan daya lebih besar.
5. Disarankan pada penelitian selanjutnya untuk melakukan pengujian sehingga dapat membandingkan hasil simulasi dengan hasil pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zhang, H., Guo, X., Xu, L., Hu, S., Fang, Z., May. 2014. "Parameters Analysis of Hydraulic-Electrical Energy Regenerative Absorber on Suspension Performance". **Hindawi Publishing Corporation**.
- [2] Wang, R., Chen, Z., Xu, H., Schmidt, K., Gu, F., Ball, A. D., 2014. "Modelling and Validation of a Regenerative Shock Absorber System". **Proceedings of the 20th International Conference on Automation & Computing**. UK, 12-13 September.
- [3] Wang, Ruichen, Cattley, Robert, Tian, X., Gu, Fengshou and Ball, Andrew. 2013. "A Valid Model of a Regenerative Hybrid Shock Absorber System". **Proceedings of Computing and Engineering Annual Researchers' Conference**.
- [4] Prabowo, C. Bayu. 2014. **Pengembangan Dan Uji Karakteristik Dinamis Dan Energi Bangkitan *Hydraulic Motor Regenerative Shock Absorber* (HM RSA)**. Surabaya: Teknik Mesin ITS.
- [5] Anuar, Kaspul. 2014. **Karakteristik Redaman Dan Energi Bangkitan Dari Regenerative Shock Absorber Dengan Motor Hidrolik**. Surabaya: Teknik Mesin ITS.
- [6] Nagaraja, Chandan. 2012. **Hydraulic Accumulator**. <URL: http://www.slideshare.net/chandannd/hydraulic-accumulator?qid=f99cd6ba-ce8d-4bd3-b22d-10ba6d136323&v=qf1&b=&from_search=1>
- [7] Bauer, Wolfgang. 2011. **Hydropneumatic Suspension Systems**. German: Springer.

- [8] Zi, X., Guo, S., Guo, X., Pan J., 2013 “A Study on the Theory and Performance Simulation of the Hydraulic Electromagnetic Energy-Regenerative Shock Absorber”. **Trans Tech Publications**. Switzerland.
- [9] Rao, Singiresu S. 2011. **Mechanical Vibrations Fifth Edition**. Miami: Pearson Education, Inc.
- [10] Zhang, Y., Zhang, X., Zhan, M., Guo, K., Zhao, F., Liu, Z., 2014. “Study on A Novel Hydraulic Pumping Regenerative”. **Journal of the Franklin Institute**.
- [11] Wikipedia. 2015. “Vibration”. Wikimedia Foundation, Inc. <URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Vibration>>
- [12] Fox dan McDonald’s. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics Eighth Edition**. Amerika: John Wiley & Sons, Inc.
- [13] “Where Energy Goes: Gasoline”. **fueleconomy.gov (the official U.S. government source for fuel economy information)**. <URL: <https://www.fueleconomy.gov/feg/atv.shtml>>
- [14] Chandler, David L., 2009. “More Power from Bumps in the Road”. **MIT News Office**. <URL: <http://newsoffice.mit.edu/2009/shock-absorbers-0209>>
- [15] Close, Charles M., Frederick, Dean H., dan Newell, Jonathan C. 2001. “Modelling and Analysis of Dynamics Systems”. **John Wiley & Sons, Inc.**
- [16] “Suspension: Simulink Modelling”. **Control Tutorials for MATLAB & SIMULINK**

<URL:<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=Suspension§ion=SimulinkModeling>>

- [17] Santosa, Dikki Tesna, Sumardi, dan Triwiyatno, Aris. 2012. "Perancangan Sistem Suspensi Aktif Nonlinear Tipe Paralel dengan Kendali *Hybrid* Fuzzy PID pada Model SeperempatKendaraan. Semarang:Universitas Dipenogoro.
- [18] Zessar, Faldy dan Wasiwitono, Unggul. 2012. "Desain dan Analisa Sistem Suspensi Kendaraan Multiguna Pedesaan". Surabaya:Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [19] Ghasemalizadeh, O., Taheri, S., Singh, A., Goryca, J. 2014. "Semi-Active Suspension Control Using Modern Methodology: A Comprehrnsive Comparison Study". **2014 NDIA Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium**. Michigan, 12-14 Agustus.
- [20] Setiawan, Listy F. 2014. **Modeling and Analysis of The Influence of Asymmetrical Damper on The Ride Comfort of The Vehicle**. Surabaya: Teknik Mesin ITS.

BIODATA PENULIS



Penulis lahir di Surabaya pada 8 April 1993 dan anak kedua dari dua bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Bhakti 6 Gresik (1997-1999), SDN Pongangan 2 Gresik (1999-2005), SMPN 1 Gresik (2005-2008), SMAN 1 Gresik (2008-2011). Setelah lulus SMA, penulis mengikuti SNMPTN jalur Undangan pada tahun 2011 dan diterima di jurusan Teknik Mesin ITS. Penulis terdaftar dengan NRP 2111 100 020. Di jurusan Teknik Mesin, penulis mengambil bidang studi Vibrasi dan Sistem Dinamis sebagai bahasan tugas akhir. Selama masa kuliah, penulis aktif mengikuti salah satu organisasi di jurusan Teknik Mesin, yaitu Mesin Music Club (MMC). Dalam organisasi tersebut, penulis menjadi staf inventaris (2012-2013) dan menjadi kepala divisi eksternal (2013-2014). Selain itu penulis juga aktif menjadi panitia untuk event-event di jurusan Teknik Mesin ITS.

Jika ada informasi, pertanyaan maupun saran yang ingin disampaikan kepada penulis, dipersilahkan untuk menyampaikannya melalui email sawung.snf@gmail.com.